『グランツーリスモ７』における レンダリング技術解説

㈱ポリフォニー・デジタル
鈴木 健太郎
高野 修一
平井 健太朗

POLYPHONY™ DIGITAL

グランツーリスモ7

- PlayStation®4/5 用ドライビングシミュレーター
- より進化した挙動
- 400車種以上を再現
- フォトリアリスティックな映像
- 時間天候変化をサポート

POLYPHONY™ DIGITAL

本セッションの内容

- リアルタイムレイトレーシング
- 天球レンダリング
- 路面と芝生のメソスケール材質表現

リアルタイムレイトレーシング

高野 修一

POLYPHONY™ DIGITAL

モチベーション

- PlayStation®5 でHWレイトレーシング機能をサポート
  - SDKでの厚いサポート
  - サンプルも充実

- クルマとレイトレーシングの相性の良さ
  - 艶のあるマテリアルで効果がわかりやすい
  - 反射はクルマのデザインを構成する要素でもある

TTS

TTS

レイトレーシング使用シーンの一例

POLYPHONY™
DIGITAL

AMG
GRAN TURISMO
Transurban
FRONT
LEFT

XV 3314

BMW
M

基本方針

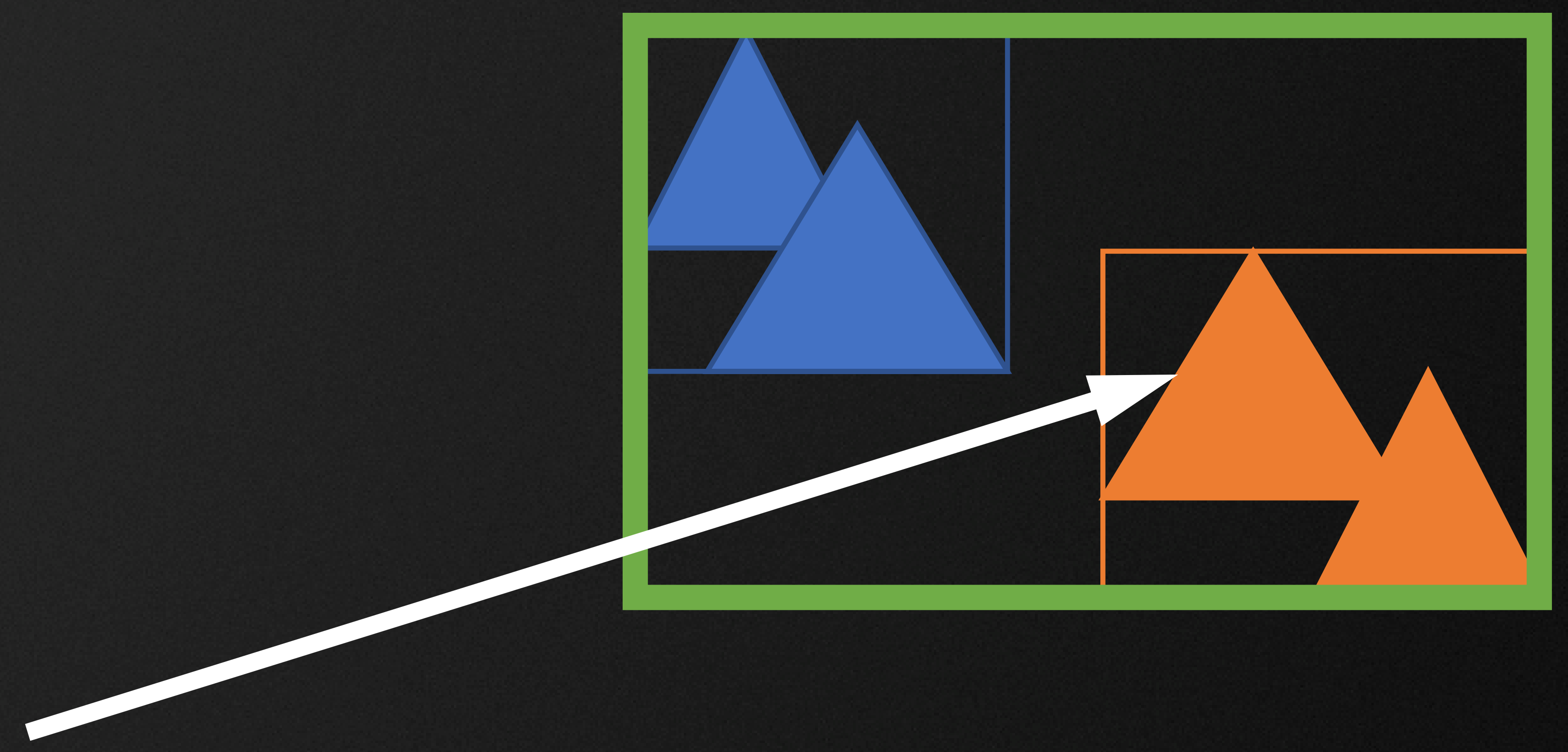
- あまり開発コストを割きたくない
- FPSが重要なレース中にはレイトレーシングを適用しない
- 専用アセットをなるべく作らない
- PSR（PS5 SDK付属ライブラリ）を使う

POLYPHONY™ DIGITAL

レイトレーシングAPI

- PSR
  - 2レベルのアクセラレーションストラクチャ(BVH)
  - レイキャストによる衝突位置のクエリができる

- どのようにレンダリングに使用するのか



POLYPHONY™ DIGITAL

GT7のレンダリング構成

- 物理ベースレンダリング
  - Disney BRDF
  - 事前積分IBL

- Forward Renderer
  - マテリアルが複雑
    - メタリックフレーク
    - 路面・芝生専用シェーダ（後半のパートで解説）

- 4Kフル解像度(3840x2160)

POLYPHONY™ DIGITAL

ディフューズGI

- レイトレーシングなしでもそれなりの精度で近似されている
- 幾つかの手法
  - SHベイク
  - ライトプローブ
  - SSAO

POLYPHONY™ DIGITAL

ディフューズGI

リファレンス(パストレ)

ラスタライズ

リアルタイムレイトレーシングは不要

POLYPHONY™ DIGITAL

スペキュラーGI

- 今までのGTのレンダリングでは比較的近似精度が低かった
  - 事前積分キューブマップ
  - SSRなし
  - ローカルなオクルージョンの精度の低さが特に問題

- スペキュラーGI計算をレイトレーシングで置き換え

LaFerrari
レイトレーシングなし

LaFerrari
レイトレーシング使用

レイトレーシングなし

レイトレーシング使用

McLaren
レイトレーシングなし

McLaren
レイトレーシング使用

レイトレーシングなし

レイトレーシング使用

POLYPHONY™ DIGITAL

スペキュラーIBL

- スペキュラーIBLの分離積分近似
- $L_{specular}(\omega_o)$
$$= \int D(\omega_i, \omega_o, \alpha) \cdot F(\omega_i, \omega_o, f_0) \cdot G(\omega_i, \omega_o, \alpha) \cdot L(\omega_i)(N \cdot \omega_i) d\omega_i$$
$$\cong \left(\int F(\omega_i, \omega_o, f_0) \cdot G(\omega_i, \omega_o, \alpha)(N \cdot \omega_i) d\omega_i \right) \cdot \left(\int D(\omega_i, \omega_o, \alpha) \cdot L(\omega_i)\, d\omega_i \right)$$
- ここで
  - D: 法線分布関数
  - F: フレネル項
  - G: マスキング関数
  - L: 放射輝度

POLYPHONY™ DIGITAL

レイトレーシングでのスペキュラーGI

- 分離せずに計算可能だが…
- レイトレーシングでも分離積分近似を使う
  - 計算の簡略化
  - フィルタの安定化
  - 基本Forwardなのであまり多くのパラメータを出力したくない

POLYPHONY™ DIGITAL

レイトレーシングでのスペキュラーGI

- $\int D(\omega_i)\, L(\omega_i)\, d\omega_i$ を求める
- $L(\omega_i)$ を再帰的に計算すればパストレになる
  - 収束が遅い
  - 反復計算が必要
- $L(\omega_i)$ をラスタライズと同様のアルゴリズムで計算
  - モンテカルロ積分無しで近似値が求まるので収束が速い
  - 既にそれなりのGI効果が考慮されていて複数回の反射をトレースする必要がない
  - 高次反射成分は正確度が低くても目立ちづらい

POLYPHONY™ DIGITAL

基本的な処理の流れ

- ラスタライズ
  - 直接光＋ディフューズGI
  - 薄いG-Bufferを出力
- レイトレーシングによるスペキュラーGI計算
  - スクリーンスペースの情報からレイを発生
  - レイの衝突点からの放射輝度を計算
  - デノイズ
- 合成
- 半透明やポストエフェクトなど

ラスタライズパス

- 概ね通常と同じForwardレンダリングを行う
  - スペキュラーIBLは載せない
  - カラー、ベロシティを出力

- いくつかのアトリビュートを追加で出力
  - 法線
  - Roughness
  - スペキュラーの係数(事前積分)

AMG
AMG

レイトレーシングパス

- 4Kフル解像度でのレイトレーシングは厳しい
- 縮小バッファ(1920 x 1080)で処理

- $\int D(\omega_i, \omega_o, \alpha) \cdot L(\omega_i)\, d\omega_i$ を計算したい
- モンテカルロ積分が必要
  - 極少数のサンプルとフィルタを用いて近似する

- 1フレーム当たり1 サンプル/縮小ピクセル

レイトレーシングパス

- デプス、スクリーン座標からレイの原点を
- 法線、roughness 及びノイズを用いてレイの方向を決定

- Roughnessに応じたGGXのインポータンスサンプリング
  - $\phi_h = 2\pi\xi_1$
  - $cos\theta_h = \sqrt{\frac{1-\xi_2}{1+(\alpha^2-1)\xi_2}}$
  - $h = (sin\theta_h cos\phi_h, sin\theta_h sin\phi_h, cos\theta_h)$

- ワールド座標に変換してレイトレーシング！

POLYPHONY™ DIGITAL

シェーディング

- ヒットした点からレイ原点に向けた放射輝度を計算
- ラスタライズでのシェーディングと同等のアルゴリズム
- ヒットした面のマテリアルの Function Shader 呼び出し

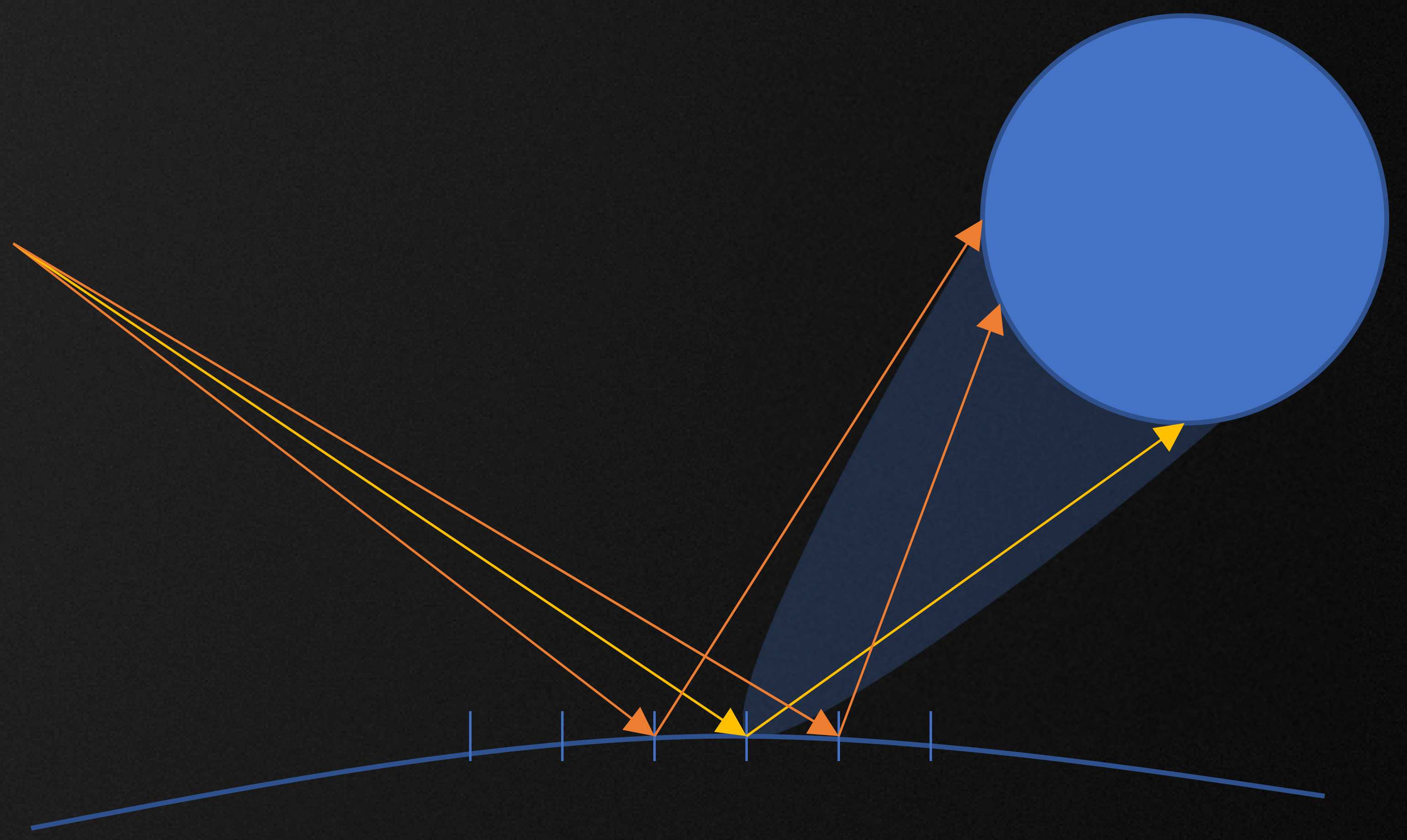
- フィルタの為に幾つかのアトリビュートを出力
  - カラー(YCoCg)
  - 反射方向
  - ヒット位置の距離
  - 1/pdf

サンプル再利用フィルタ

- 周辺のサンプルを再利用して実効的なサンプルを増やす
- Stochastic Screen-Space Reflections [Stachowiak 2015]

```
result    = 0.0
weightSum = 0.0
for pixel in neighborhood:
    weight = localBrdf(pixel.hit) / pixel.hitPdf
    result += color(pixel.hit) * weight
    weightSum += weight
result /= weightSum
```

- 分散のために輝度の２乗の平均も計算しておく
- あまりに分散が高いピクセルはクランプ

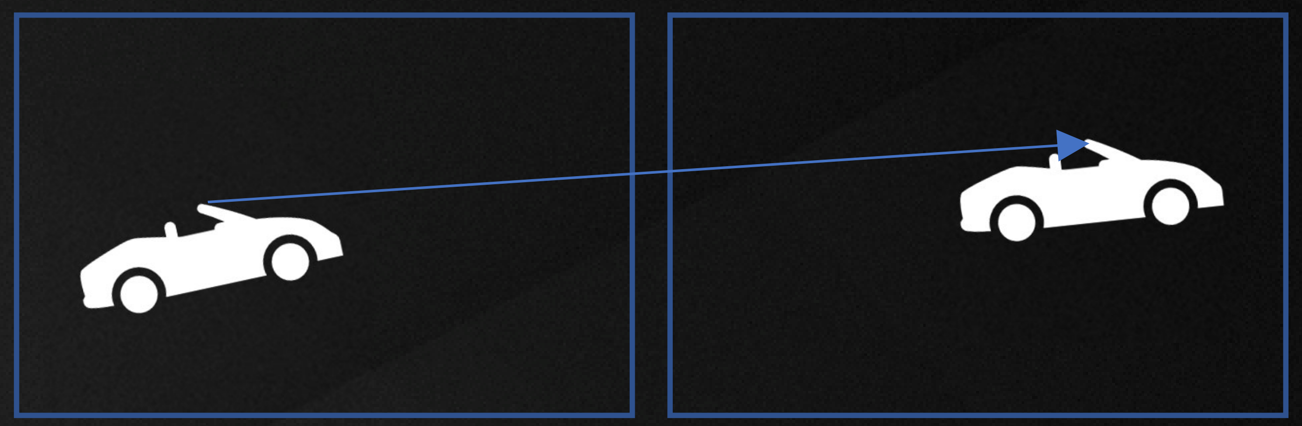


POLYPHONY DIGITAL

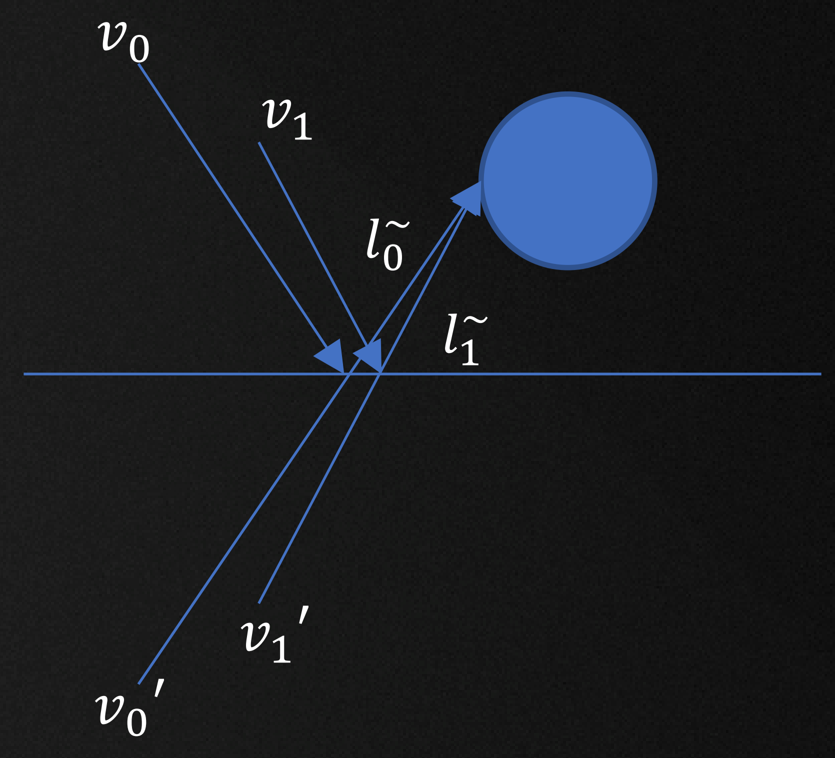
AMG

テンポラルフィルタ

- 前のフレームまでの計算結果を再利用
- 指数移動平均によるモンテカルロ積分



- ２種類のリプロジェクション
  - ベロシティによるリプロジェクション(roughness高)
  - 平均反射距離によるリプロジェクション(roughness低)



- 過去のピクセルの輝度の分散などからウェイトを決定
  - exp(-scale * abs(history.x – colorAve.x) / sqrt(historyVariance))
- 現在のサンプルの色の分散から一定の範囲の色の外にあれば棄却
- Roughnessなどに応じてパラメータは調整…

- YCoCgのカラーと輝度の２乗を出力
  - ピクセルの時系列での分散が計算できる

POLYPHONY™ DIGITAL

AMG

AMG

空間フィルタ

- 中央からの差分で重み付けされたバイラテラルフィルタ
  - 輝度差
  - 法線の差
  - デプス差

- 分散が高いピクセルの輝度差のウェイトを削減
- roughness 等を使ってパラメータを調整

POLYPHONY™ DIGITAL

AMG

テンポラルアンチエイリアシング

- レイトレーシング縮小バッファに対するTAA
- ベロシティによるリプロジェクション

- 前段のテンポラルフィルタとは別に必要
  - ピクセル分散を壊さない
  - 空間フィルタ後に適用することで安定に

- 劇的に安定化

POLYPHONY™ DIGITAL

合成

- バイラテラルアップサンプリング
  - 高解像度デプスと縮小デプスを見て重み付け
- スペキュラ強度バッファをかけてラスタライズパス出力と合成

- 空、半透明、ポストエフェクト等へ続く

AMG

AMG
AMG
AMG
AMG

制限

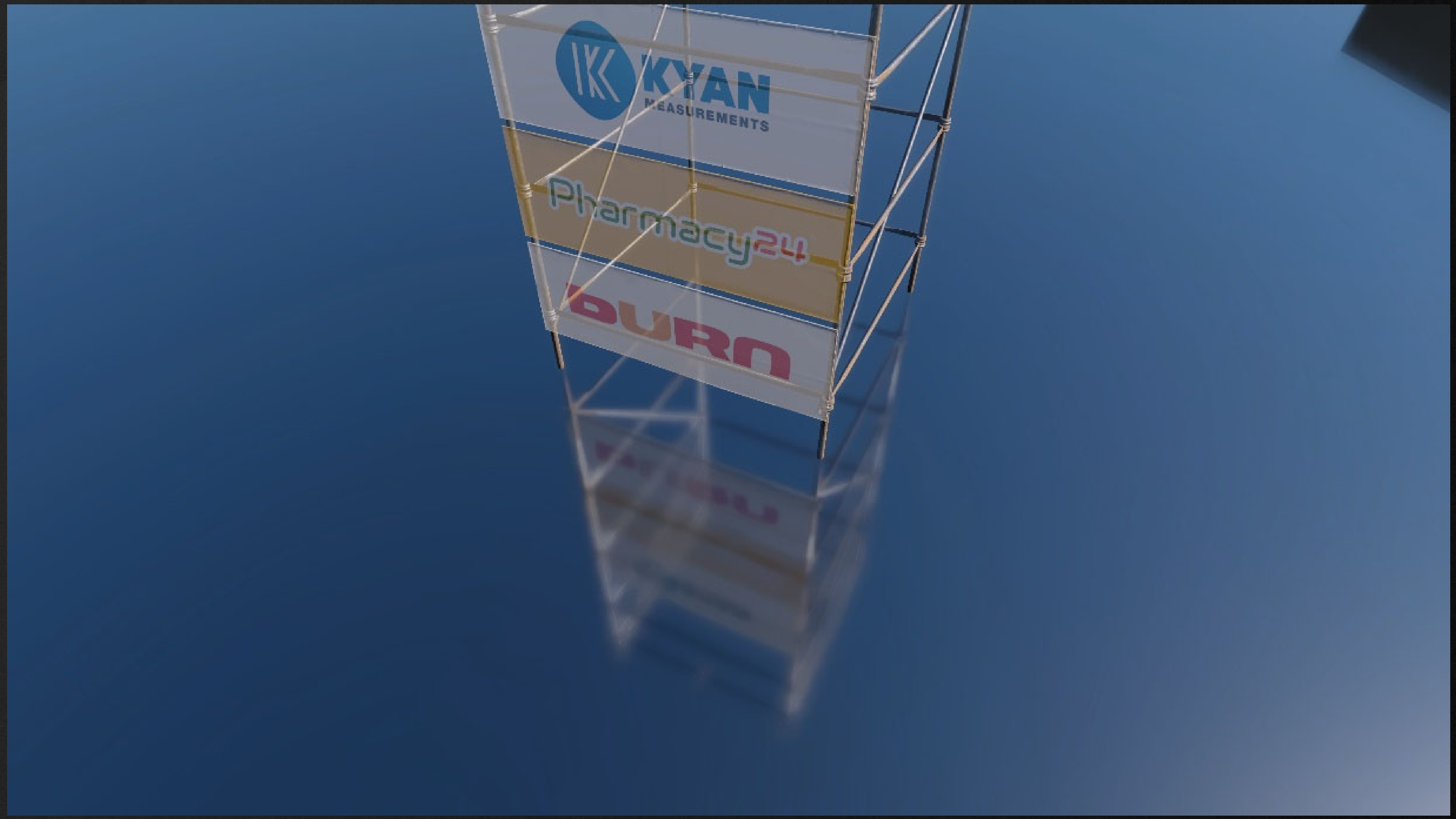
- 半透明部分へのレイトレーシングスペキュラーには非対応
- G-Bufferを別途描画することで対応は可能

POLYPHONY™ DIGITAL

制限

- レイトレーシング世界内で半透明が存在できない
  - レイキャスト＋シェーディングを複数回反復するコストが高すぎる

- ディザリングによる半透明で代替
- そもそも半透明を使わない



POLYPHONY™ DIGITAL

制限

- ビルボードをうまく扱えない
  - 全てのレイに正対するビルボードは作れない
- 十字に配置した板に変換して妥協

POLYPHONY™ DIGITAL

最適化

Deferred Function Shader

- SDK の psr_deferred_function_shader サンプル
- レイキャスト後その場でマテリアルを直接評価する場合、シーン中で最も複雑なマテリアルのABIを全体で使用することになる
- レイの交差情報をバッファに格納しマテリアル評価を遅延する
- マテリアル評価のFunction ShaderのABIでソートしてから実行

- G-Buffer
  - 重心座標(11bit x 2)
  - mipmap offset(1:5:4 float))
  - Triangle Index(17bit)
  - 1/pdf(0:5:10 float)

2層スペキュラー

- メタリックペイント
  - ベース金属フレーク層
  - クリアコート層

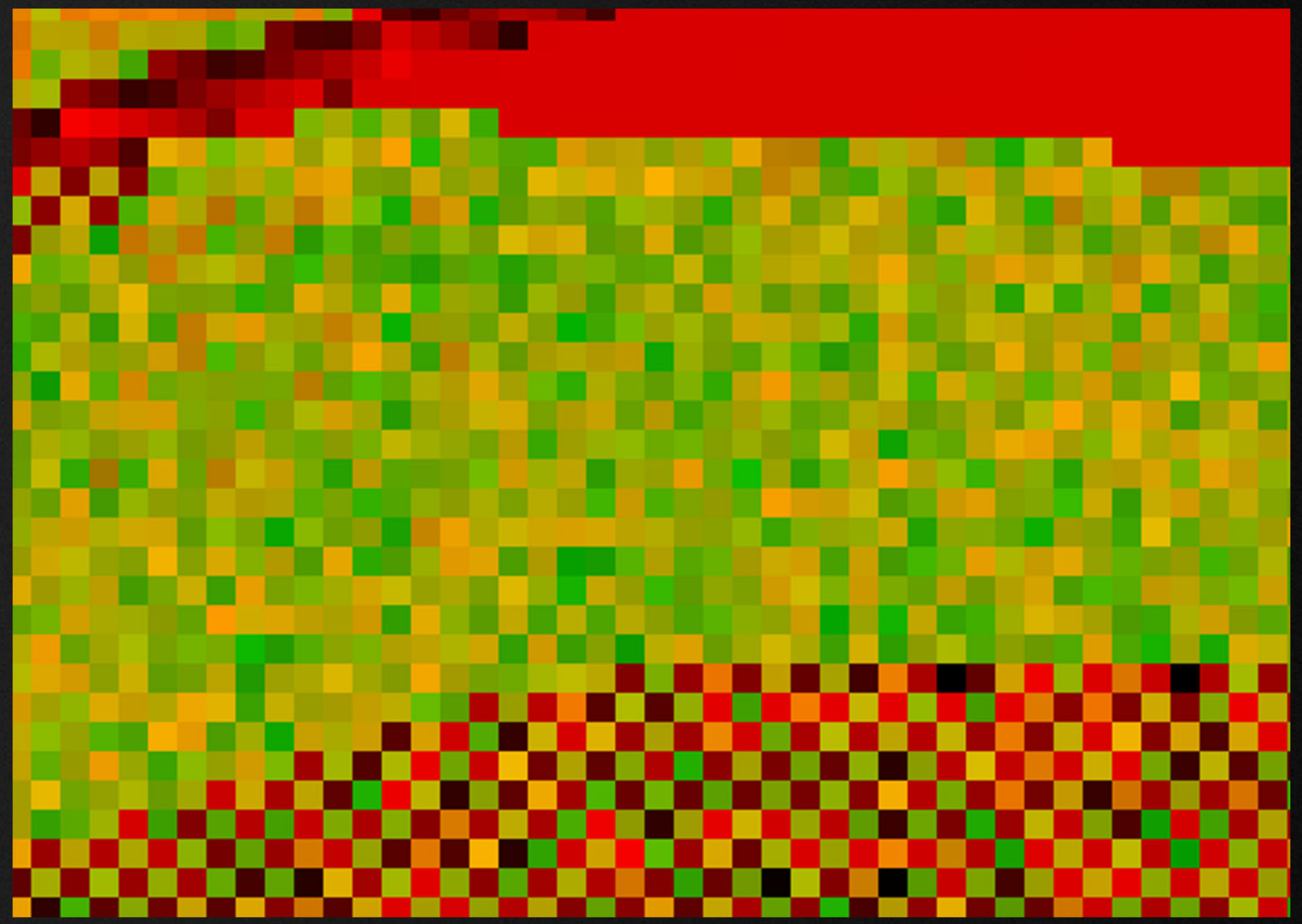
- 1 sample/pixel の予算しかない
- クリアコート層は完全鏡面に近いことが多い
  - 静止時はフルピクセルの情報が無いと目立つ

POLYPHONY™ DIGITAL

2層スペキュラー

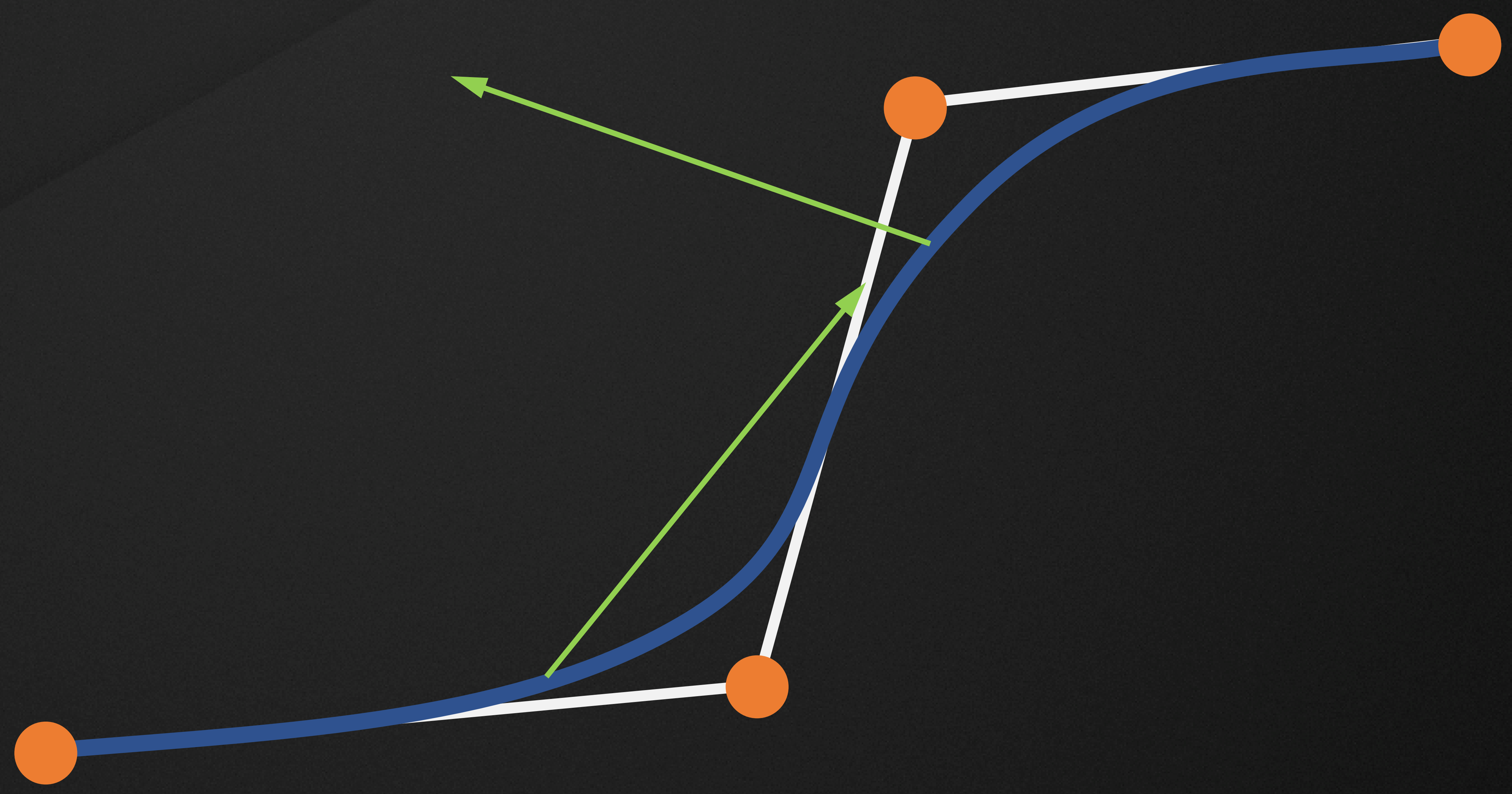
- チェッカーボード状にサンプルする層を分ける
  - ベース層
  - クリアコート層(ある時)

- フレームごとにサンプル位置を入れ替える
- 層ごとに穴埋め



サブディビジョン

- クルマのモデリングにサブディビジョンサーフェスを使用
- サブディビジョンサーフェスのレイトレーシングにはケージ形状をそのまま使っている
- バックサーフェスカリング有効なら、自己交差はほとんど問題にならない



POLYPHONY DIGITAL

まとめ

- レイトレーシングを使ったスペキュラーGIを実現
- 多くのフィルタとヒューリスティックで問題を封じ込めた

POLYPHONY™ DIGITAL

今後

- レイのコヒーレンシ改善

- ノイズをもっと減らしたい
  - 光源分布を使ったインポータンスサンプリング
  - より良いフィルタの検討

- ディフューズ対応

- パストレーシング(リファレンス)

参考

- [Shopf 2009] Jeremy Shopf, Mixed Resolution Rendering
- [Burley 2012] Brent Burley, Physically-Bases Shading at Disney
- [Stachowiak 2015] Tomasz Stachowiak, Stochastic Screen-Space Reflections
- [Schied 2017] Christoph Schied, Real-Time Reconstruction for Path-Traced Global Illumination
- [Stachowiak 2018] Tomasz Stachowiak, Raytracing in Hybrid Real-Time Rendering
- PlayStation 5 SDK

POLYPHONY™ DIGITAL

天球レンダリング

鈴木健太郎

時間変化・天候変化

GT7においてレース中の時間変化・天候変化を導入することになった。

- 時間変化
  - 長時間レースの再現が可能になり、よりリアルなレース体験の提供。
  - 天球とライティングの変化に伴う、様々な美しい景観の提供。
- 天候変化
  - 晴と雨の間の変化によって、路面のコンディションなどの変化を再現し、ライン取りやタイヤ交換などに新たなゲーム性を提供。
  - 時間変化同様、予測不能に変化する雲の表情に由来する一期一会的な景観の提供。

POLYPHONY™ DIGITAL

時間変化・天候変化

GT7においてレース中の時間変化・天候変化を導入することになった。

- 時間変化
  - 長時間レースの再現が可能になり、よりリアルなレース体験の提供。
  - 天球とライティングの変化に伴う、様々な美しい景観の提供。
- 天候変化
  - 晴と雨の間の変化によって、路面のコンディションなどの変化を再現し、ライン取りやタイヤ交換などに新たなゲーム性を提供。
  - 時間変化同様、予測不能に変化する雲の表情に由来する一期一会的な景観の提供。

POLYPHONY™ DIGITAL

時間変化・天候変化

GT7においてレース中の時間変化・天候変化を導入することになった。

- 時間変化
  - 長時間レースの再現が可能になり、よりリアルなレース体験の提供。
  - 天球とライティングの変化に伴う、様々な美しい景観の提供。
- 天候変化
  - 晴と雨の間の変化によって、路面のコンディションなどの変化を再現し、ライン取りやタイヤ交換などに新たなゲーム性を提供。
  - 時間変化同様、予測不能に変化する雲の表情に由来する一期一会的な景観の提供。

時間変化・天候変化

GT7においてレース中の時間変化・天候変化を導入することになった。

- **時間変化**
  - 長時間レースの再現が可能になり、よりリアルなレース体験の提供。
  - 天球とライティングの変化に伴う、様々な美しい景観の提供。
- **天候変化**
  - 晴と雨の間の変化によって、路面のコンディションなどの変化を再現し、ライン取りやタイヤ交換などに新たなゲーム性を提供。
  - 時間変化同様、予測不能に変化する雲の表情に由来する一期一会的な景観の提供。

時間変化・天候変化はレースゲームにおいて重要度が高い！

POLYPHONY™ DIGITAL

リアルタイム天球レンダリング

時間変化・天候変化を実現するために必要な要素は数多くある。今回は、特に天球に絞って説明。

- **必要な要件**
  - リアルタイムに種々のパラメータが変更可能であること。
  - PS4とPS5の両方でクオリティ・パフォーマンスともに問題なく動作すること。
  - GTは空を描画するパスとカメラの種類がとても多いので、フラスタムに依存しないようにする。
    - メイン画面
    - ライトプローブ
    - 水面
    - バックミラー
    - etc

POLYPHONY DIGITAL

リアルタイム天球レンダリング

時間変化・天候変化を実現するために必要な要素は数多くある。今回は、特に天球に絞って説明。

- **必要な要件**
  - リアルタイムに種々のパラメータが変更可能であること。
  - PS4とPS5の両方でクオリティ・パフォーマンスともに問題なく動作すること。
  - GTは空を描画するパスとカメラの種類がとても多いので、フラスタムに依存しないようにする。
    - メイン画面
    - ライトプローブ
    - 水面
    - バックミラー
    - etc.

POLYPHONY™ DIGITAL

空と雲

- 天球を構成する要素として、**空と雲**が挙げられる。
- まず空について、そして雲について、どのようにレンダリングしたかを説明する。

空

雲

POLYPHONY™ DIGITAL

空のレンダリング

空のレンダリング（概論）

- CG業界において、空のシミュレーション・レンダリングには長い歴史がある。
- オフラインレンダリング、リアルタイムレンダリング、様々な応用先が存在する。
- 一般には、与えられた大気モデルに対して**ボリュームレンダリング方程式** [Novák et al. 2018]を用いて光の大気散乱を計算することになる。

POLYPHONY™ DIGITAL

空のレンダリング（概論）

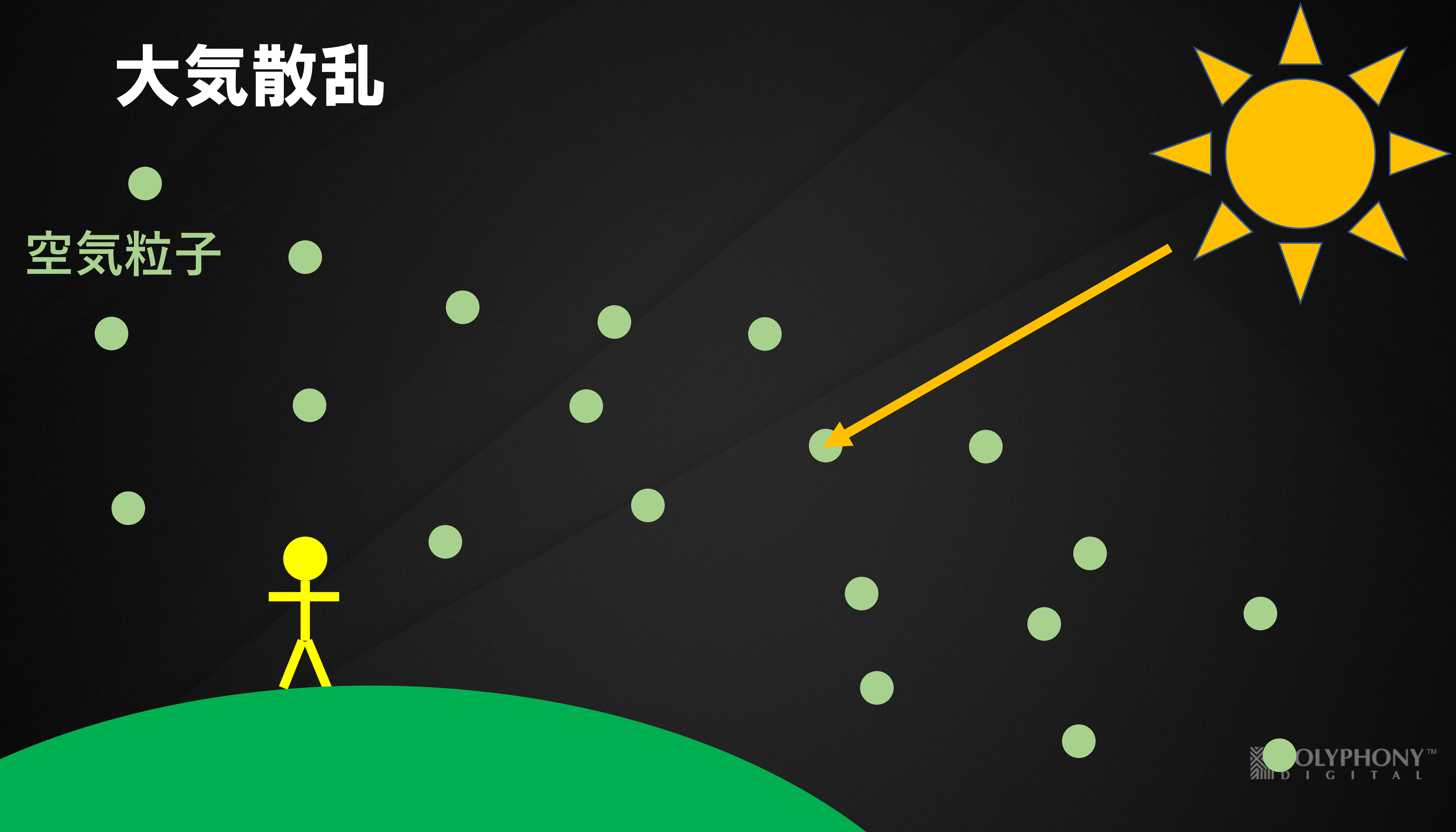
- CG業界において、空のシミュレーション・レンダリングには長い歴史がある。
- オフラインレンダリング、リアルタイムレンダリング、様々な応用先が存在する。
- 一般には、与えられた大気モデルに対して**ボリュームレンダリング方程式**[Novák et al. 2018]を用いて光の大気散乱を計算することになる。

$$L(\vec{x},\vec{\omega}) = T(\vec{x},\vec{z})L(\vec{z},\vec{\omega}) + \int_{0}^{z} T(\vec{x},\vec{y}) \left[\mu_a(\vec{y})L_e(\vec{y},\vec{\omega}) + \mu_s(\vec{y}) \int_{S^2} f_p(\vec{\omega},\vec{\omega}')L_i(\vec{y},\vec{\omega}')d\vec{\omega}' \right] dy$$

POLYPHONY™ DIGITAL

大気散乱

大気散乱

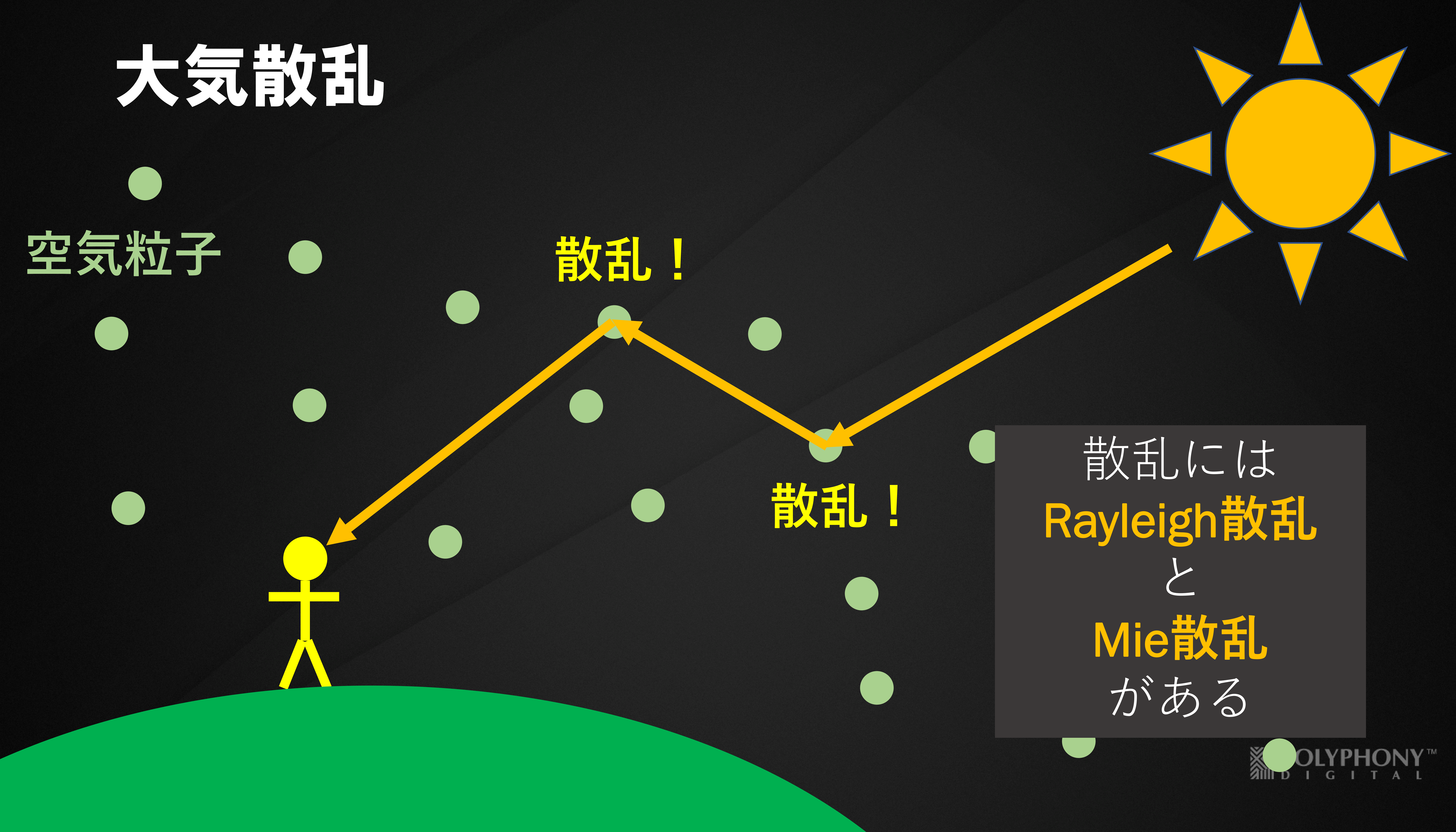


大気散乱

大気散乱

POLYPHONY DIGITAL

大気散乱



散乱には
Rayleigh散乱
と
Mie散乱
がある

POLYPHONY™ DIGITAL

代表的な研究

1993, 1996　西田らによる空モデル

CG分野における、物理的な空のレンダリング論文として今なお基礎となる研究。[Nishita et al. 1993, 1996]

2008　Precomputed Atmospheric Scattering

コンパクトなLUT上で大気による光散乱を計算することで高速に空をレンダリング。[Bruneton and Neyret 2008]

2012　An Analytic Model for Full Spectral Sky-Dome Radiance

事前に長時間かけて散乱を計算しておき、解析的な関数にフィッティング。[Hosek and Wilkie 2012]

2020　A Scalable and Production Ready Sky and Atmosphere Rendering Technique

新しいLUTと多重散乱計算方法を提案し、メモリと計算コストの削減を実現。[Hillaire 2020]

2021　A Fitted Radiance and Attenuation Model for Realistic Atmospheres

[Hosek and Wilkie 2012]の発展版。計測ベースの大気モデルを用いるなど、多くの拡張を含む。[Wilkie et al. 2021]

POLYPHONY™ DIGITAL

目標

- GT7における目標
  - PS4も含むためランタイムの計算コストをなるべく減らしたい。
  - メモリもあまり使いたくない。
  - 多様な空の表情を表現したい。

POLYPHONY™ DIGITAL

目標

- GT7における目標
  - PS4も含むためランタイムの計算コストをなるべく減らしたい。
  - メモリもあまり使いたくない。
  - 多様な空の表情を表現したい。

既存手法はどれも一長一短だった。
よって、既存手法を基に、改善を行った。

既存手法との比較

	実行時計算 コスト	実行時 メモリ	大気モデル	事前計算 コスト
西田モデル	✗	✓	△	✓
[Bruneton and Neyret 2008]	△	✓	△	✓
[Hosek and Wilkie 2012]	✓	✓	△	✗
[Hillaire 2020]	△	✓	△	✓
[Wilkie et al. 2021]	✓	✗	✓	✗
我々の手法	✓	✓	✓✓✓	✗

- コンパクトな事前計算LUTを使うことでランタイム計算コストの効率化。
- LUTベースなので事前計算による高品質な結果をそのまま利用可能。
- 大気モデルの自由度が高く、現実再現精度が良い。

POLYPHONY™ DIGITAL

今回実装した手法

今回実装した手法（概要）

1. 地球の大気モデルを与え、ボリュームレンダリング方程式に基づき空のレンダリングを行う環境を構築。
2. 上記結果をLook-up Table (LUT)に格納する。この時、基底となる複数のLUTを用意する。（＊基底については後述）
3. ゲーム中は、基底LUTを組み合わせて所望の時間・天候に対応する空のレンダリングを行う。

POLYPHONY™ DIGITAL

今回実装した手法（概要）

1. 地球の大気モデルを与え、ボリュームレンダリング方程式に基づき空のレンダリングを行う環境を構築。
2. 上記結果をLook-up Table (LUT)に格納する。この時、基底となる複数のLUTを用意する。（＊基底については後述）
3. ゲーム中は、基底LUTを組み合わせて所望の時間・天候に対応する空のレンダリングを行う。

POLYPHONY™ DIGITAL

今回実装した手法（概要）

1. 地球の大気モデルを与え、ボリュームレンダリング方程式に基づき空のレンダリングを行う環境を構築。
2. 上記結果をLook-up Table (LUT)に格納する。この時、基底となる複数のLUTを用意する。（＊基底については後述）
3. ゲーム中は、基底LUTを組み合わせて所望の時間・天候に対応する空のレンダリングを行う。

POLYPHONY™
DIGITAL

今回実装した手法（概要）

1. 地球の大気モデルを与え、ボリュームレンダリング方程式に基づき空のレンダリングを行う環境を構築。
2. 上記結果をLook-up Table (LUT)に格納する。この時、基底となる複数のLUTを用意する。（＊基底については後述）
3. ゲーム中は、基底LUTを組み合わせて所望の時間・天候に対応する空のレンダリングを行う。

基本的な流れは従来手法と大きくは変わらない。
ただし大気モデルとLUTの持ち方に工夫がある。

POLYPHONY™ DIGITAL

1. 高品質な空のレンダリング

- 地球大気に基づいてボリュームレンダリング方程式を計算するために、skysimというオフラインレンダラを開発。
  - フルスペクトルパストレーシング
  - Ratio-TrackingによるTransmittance推定 [Novák 2014]
  - 複数のPCを利用した大規模分散レンダリング
  - XYZ等色関数として、CIE (2006) 2-degを使用 [cmfs]
  - 大気データを自由に入力可能
  - Mie散乱の位相関数を粒子分布データに基づいて計算

POLYPHONY™ DIGITAL

1. 高品質な空のレンダリング

- 地球大気に基づいてボリュームレンダリング方程式を計算するために、skysimというオフラインレンダラを開発。
  - フルスペクトルパストレーシング
  - Ratio-TrackingによるTransmittance推定 [Novák 2014]
  - 複数のPCを利用した大規模分散レンダリング
  - XYZ等色関数として、CIE (2006) 2-degを使用 [cmfs]
  - 大気データを自由に入力可能
  - Mie散乱の位相関数を粒子分布データに基づいて計算

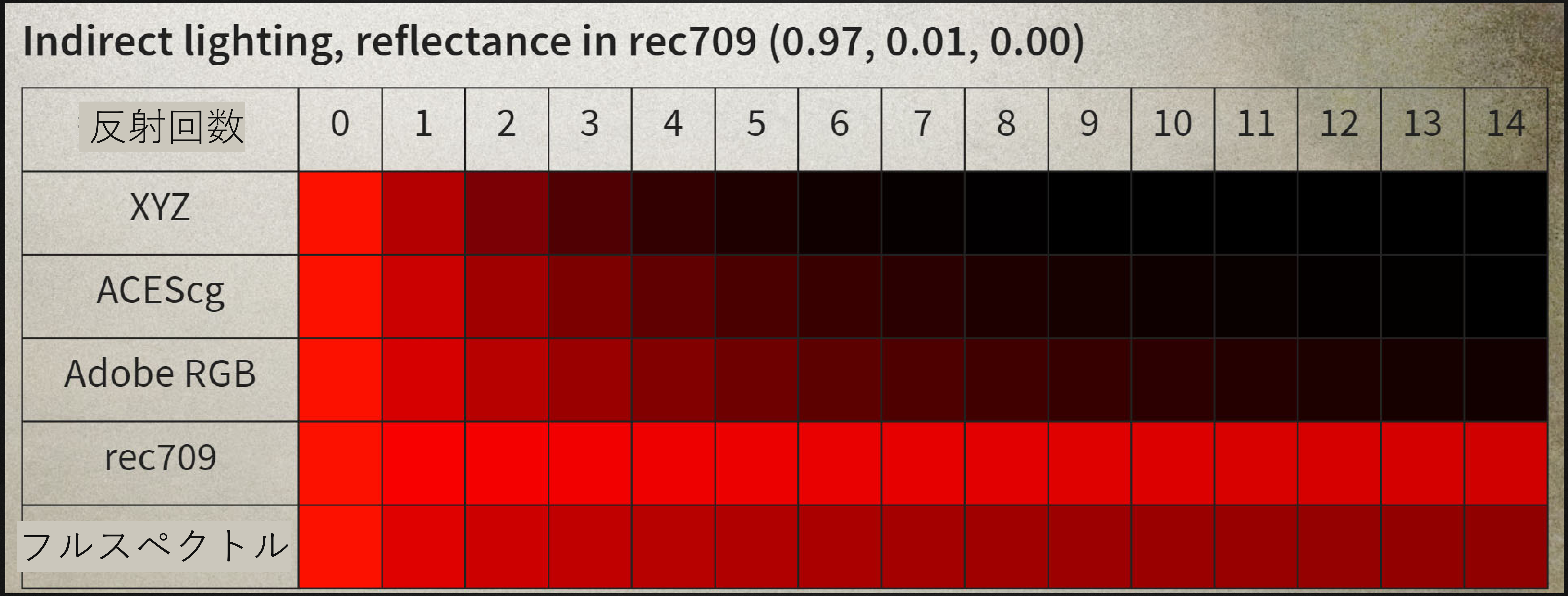
1. 高品質な空のレンダリング

- **フルスペクトルパストレーシング**
  - 空のレンダリングを行うにあたり、通常のRGBによる3chレンダリングでは不十分。よって、光の波長ごとの強度を計算する。
  - 一般に、反射や散乱回数の多いレンダリングはフルスペクトルで行わないと誤差が大きくなる。

POLYPHONY™ DIGITAL

1. 高品質な空のレンダリング

- **フルスペクトルパストレーシング**
  - 空のレンダリングを行うにあたり、通常のRGBによる3chレンダリングでは不十分。よって、光の波長ごとの強度を計算する。
  - 一般に、反射や散乱回数の多いレンダリングはフルスペクトルで行わないと誤差が大きくなる。



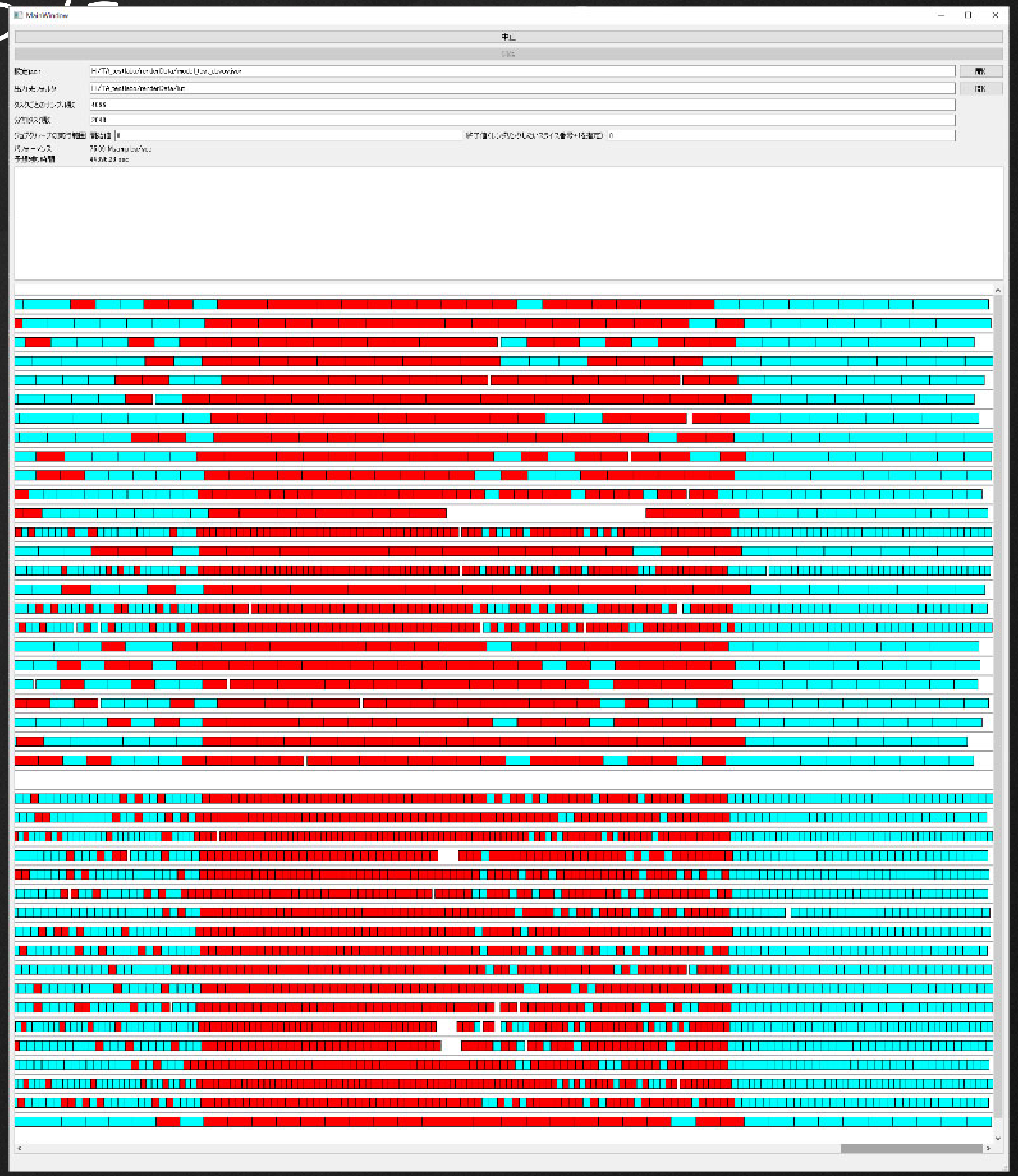
https://jo.dreggn.org/path-tracing-in-production/2017/talk-jo/

POLYPHONY DIGITAL

1. 高品質な空のレンダリング

- **複数のPCを用いた大規模分散レンダリング**
  - 開発用のPCのうち、空いているPCを自由に使用できるインフラを整備。
  - このインフラによる巨大な計算資源を活用して空のレンダリング（大気散乱シミュレーション）を行った

1行=開発スタッフのPC・1台分



POLYPHONY DIGITAL

1. 高品質な空のレンダリング

- **大気モデル**
  - U.S.Standard Atmosphereを用いた。
  - 上記に加え**オゾン層**を考慮。[Krueger and Minzner 1976][O3 Spectra]

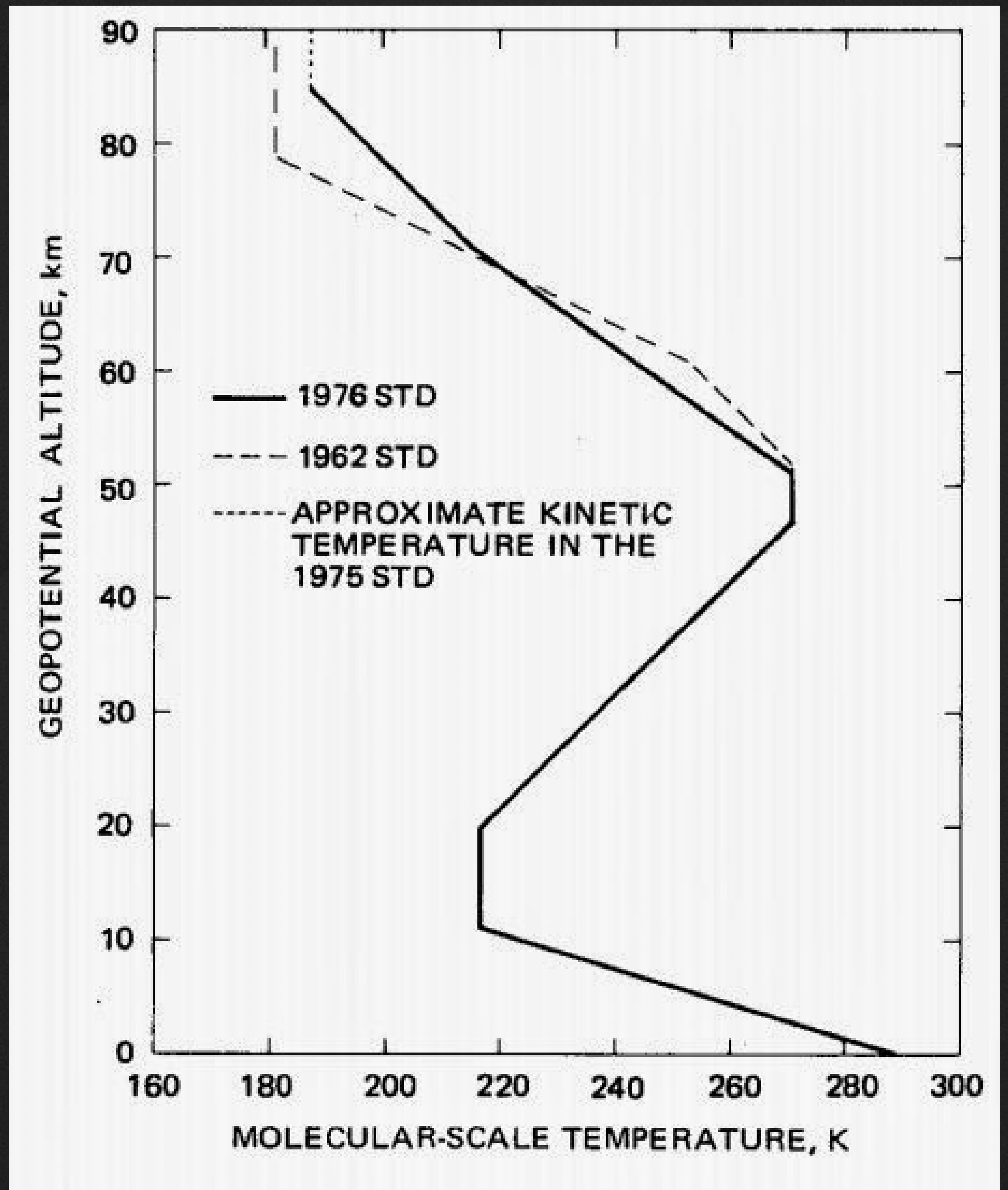


Figure 3. Molecular-scale temperature as a function of geopotential altitude

POLYPHONY™ DIGITAL

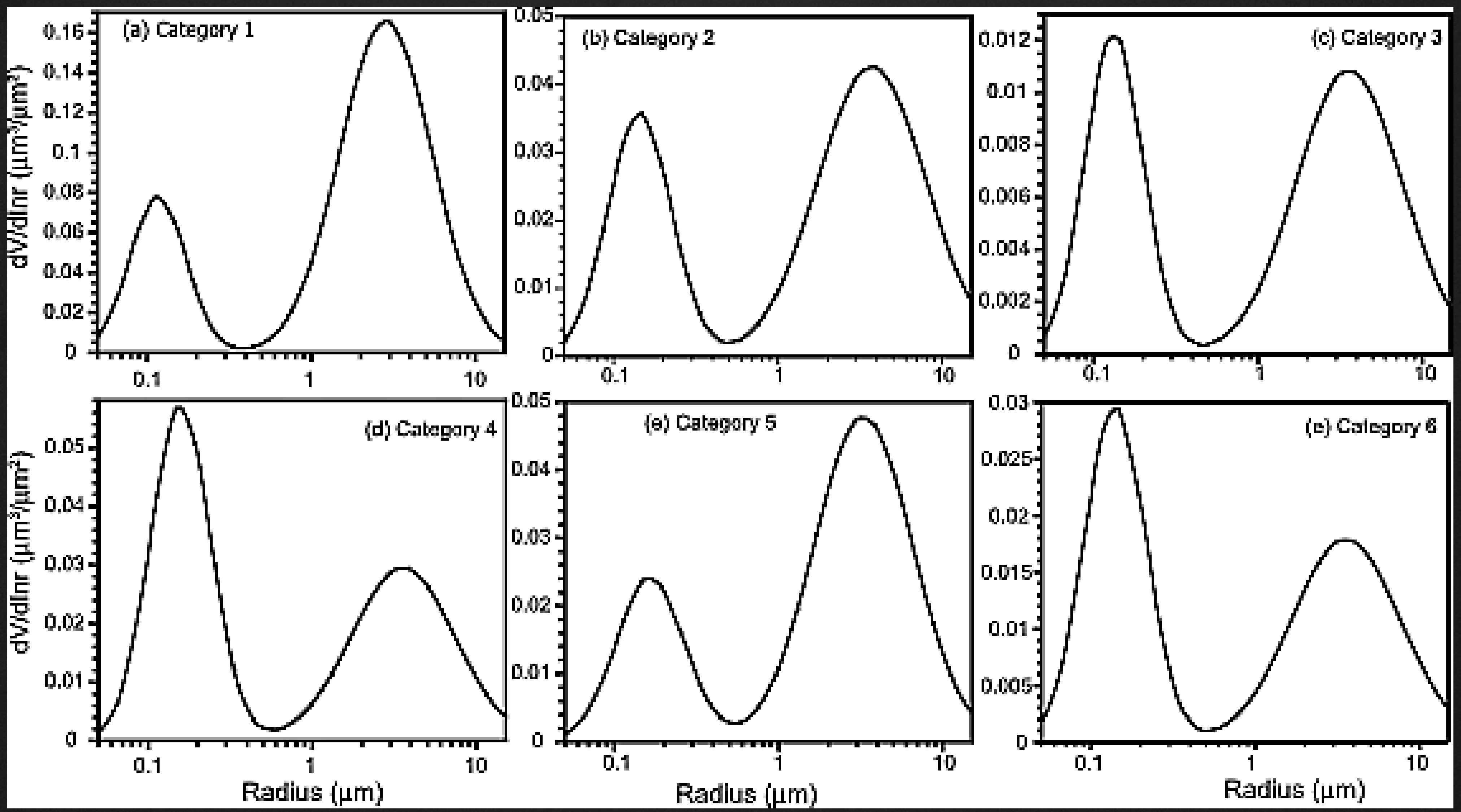
1. 高品質な空のレンダリング

- **大気モデル（続き）**
  - さらに、任意のエアロゾル粒子分布を入力可能。
  - 空の地域性は、大気中のエアロゾルが支配的な要素。この、エアロゾル粒径分布は一般にバイモーダルな対数正規分布に従う。 [Omar et al. 2005]
    - 地理条件やその日の天候、時間帯によって粒径分布が変化する。

POLYPHONY™ DIGITAL

1. 高品質な空のレンダリング

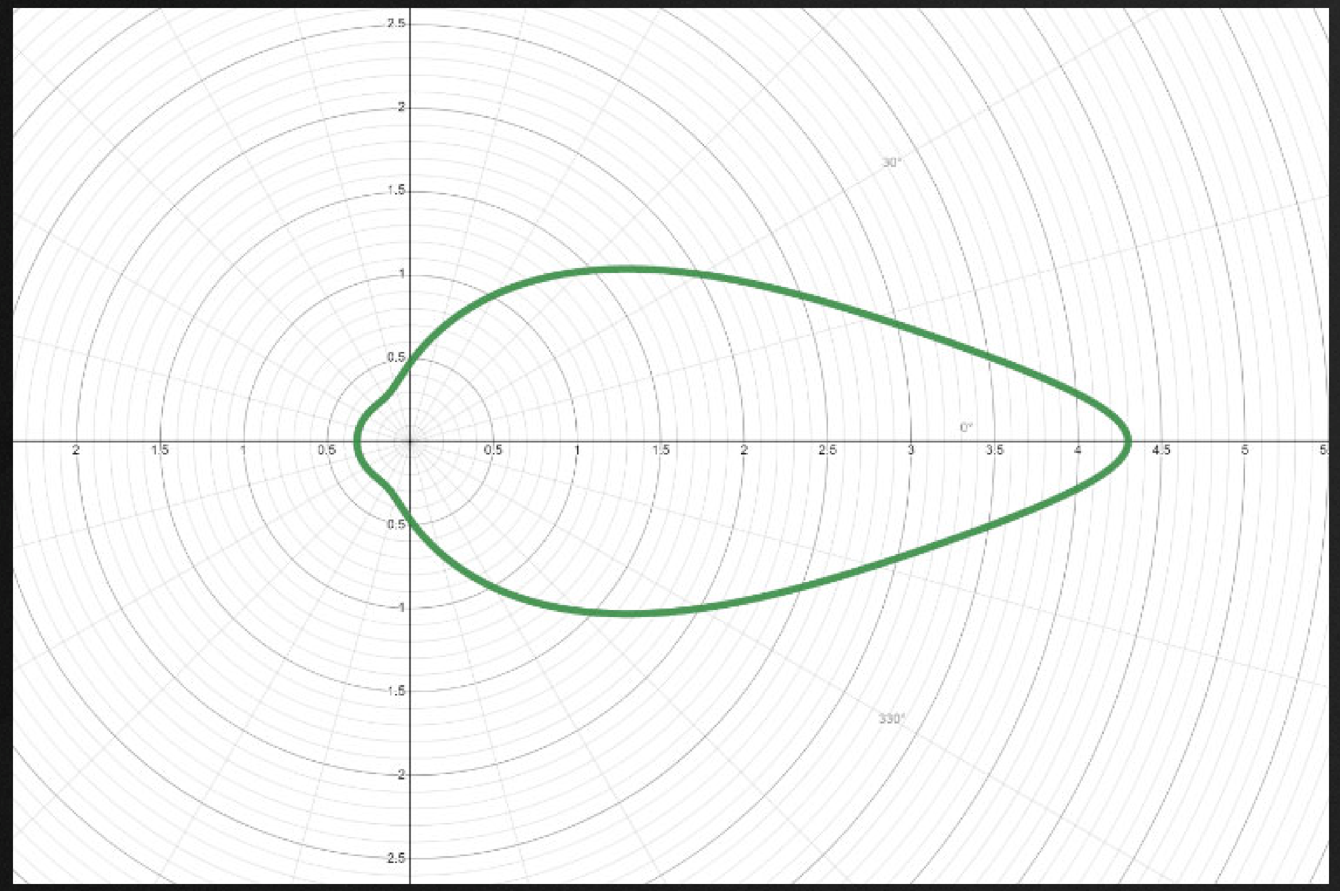
- **大気モデル（続き）**
  - さらに、任意のエアロゾル粒子分布を入力可能。
  - 空の地域性は、大気中のエアロゾルが支配的な要素。この、エアロゾル粒径分布は一般にバイモーダルな対数正規分布に従う。 [Omar et al. 2005]
    - 地理条件やその日の天候、時間帯によって粒径分布が変化する。



POLYPHONY DIGITAL

1. 高品質な空のレンダリング

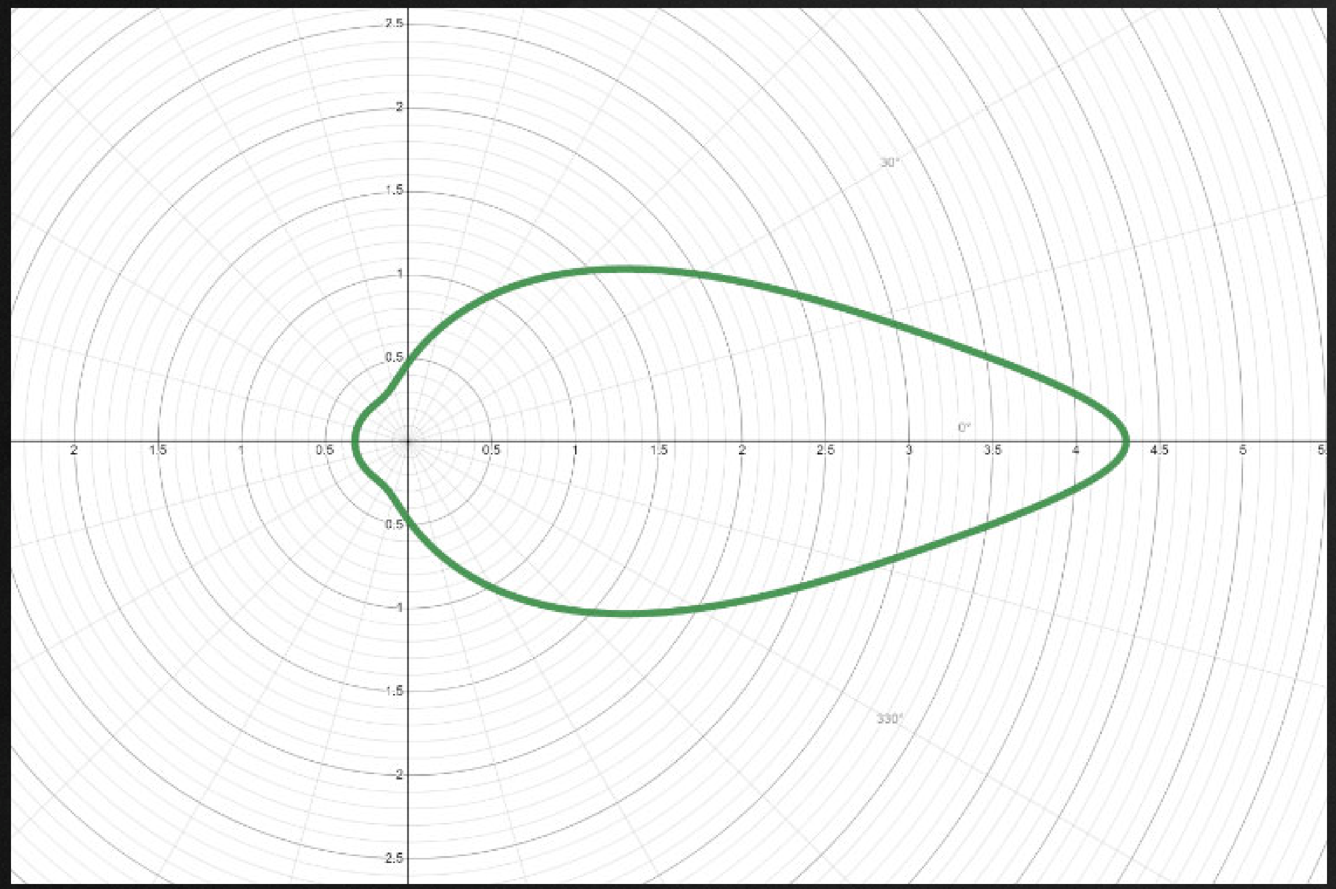
- 高精度なMie散乱位相関数
  - 既存手法は位相関数として低周波で単純なものを使う傾向があるが、これだと印象が良くなかった。
    - 例：Henyey-Greenstein位相関数、Cornette-Shanks位相関数
  - 最終的な印象を決定する要因としてMie散乱位相関数が重要であると考え、エアロゾル粒子分布から位相関数を高精度に計算して用いることで高周波な特徴が得られた。



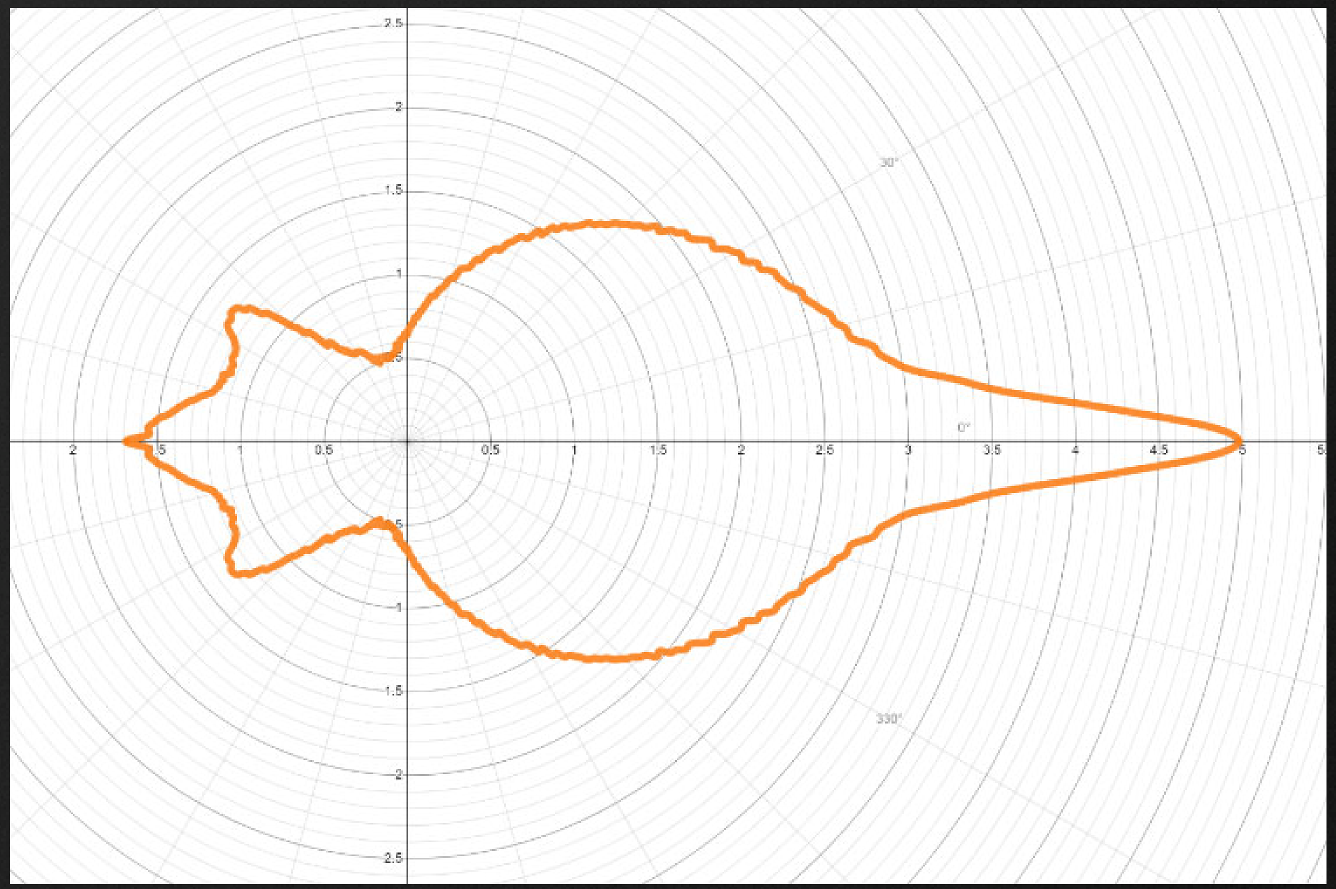
従来的な位相関数

1. 高品質な空のレンダリング

- 高精度なMie散乱位相関数
  - 既存手法は位相関数として低周波で単純なものを使う傾向があるが、これだとあまり印象が良くなかった。
    - 例：Henyey-Greenstein位相関数、Cornette-Shanks位相関数
  - 最終的な印象を決定する要因としてMie散乱位相関数が重要であると考え、エアロゾル粒子分布から位相関数を高精度に計算して用いることで高周波な特徴が得られた。



従来的な位相関数



高精度な位相関数

POLYPHONY DIGITAL

豊かな空の表情

- U.S. Standardに基づく大気分子モデル
- オゾン層
- バイモーダルなエアロゾル分布と、高精度なMie散乱位相関数

POLYPHONY™ DIGITAL

911 GT3RS

GT3RS
911 GT3RS

GT3RS
911 GT3RS

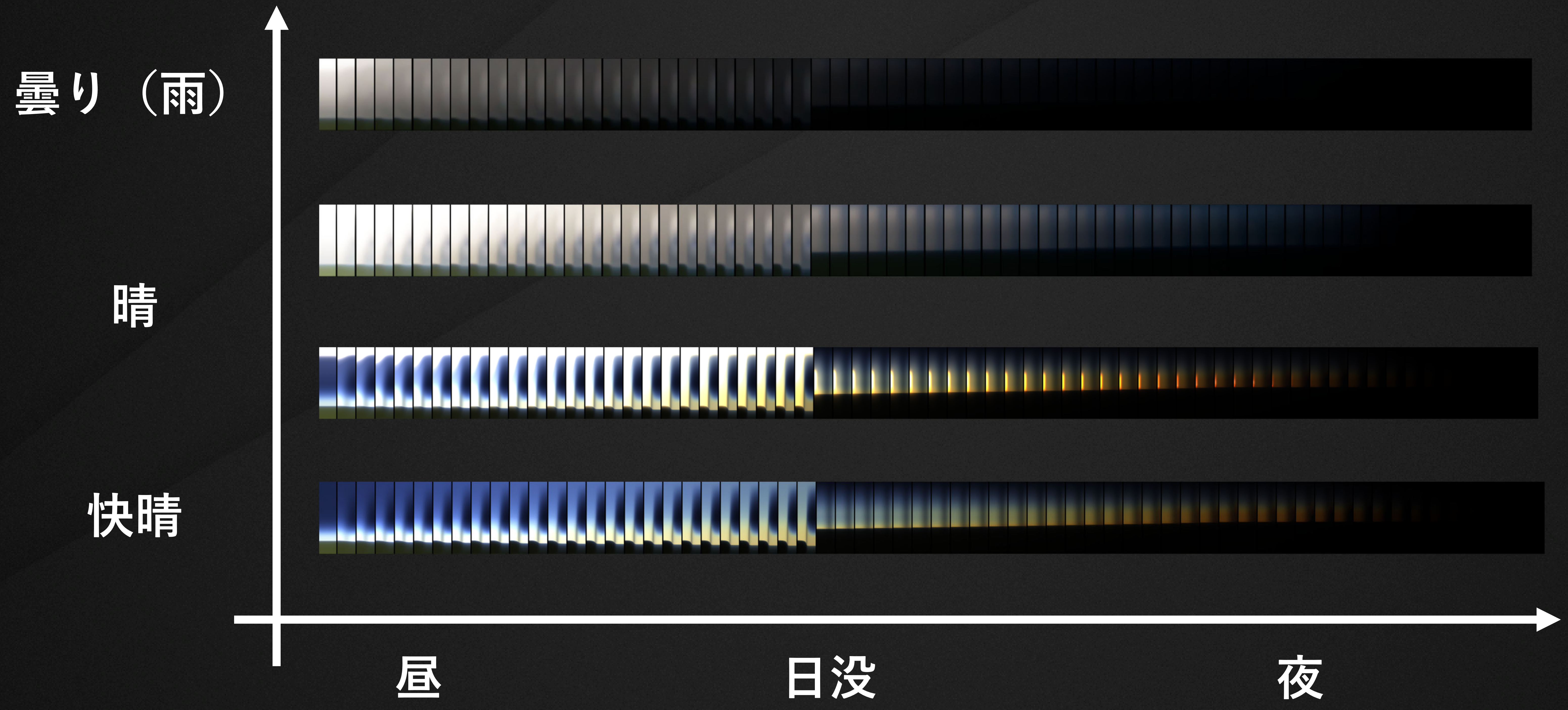
2. 基底空Look-up Table

- skysimを用いることで、大気モデルさえ与えれば任意の時刻に対応する尤もらしい空をレンダリングできるようになった。
- 最終的なゲームにおいて動的に変化するのは**時刻と天候**。よって、時刻と天候の二軸で空をレンダリングしてLUTに変換した。

POLYPHONY™ DIGITAL

2. 基底空Look-up Table

- **skysimを用いることで、大気モデルさえ与えれば任意の時刻に対応する尤もらしい空をレンダリングできるようになった。**
- 最終的なゲームにおいて動的に変化するのは**時刻と天候**。よって、時刻と天候の二軸で空をレンダリングしてLUTに変換した。



POLYPHONY DIGITAL

2. 基底空Look-up Table

- Look-up Tableテクスチャ
  - 3D LUTテクスチャに全方向の空からの放射輝度が格納される。
    - 事前計算された高品質な空レンダリング結果を保持できる。
    - 単一の天候状態に対応。
  - **時刻（太陽高度）方向** (1D)と**全球方向** (2D)についてアダプティブにマッピング、テクスチャ解像度を節約。
    - 時刻（太陽高度）方向：　64
    - 全球方向：　32 x 128
    - フォーマット：　RGB10,10,11 Float
      - 一枚当たり晴LUTで約1.0 MiB、曇LUTで約0.25 MiB

POLYPHONY™ DIGITAL

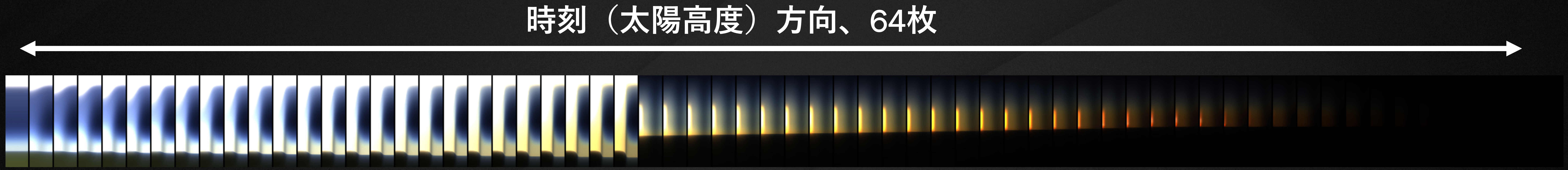
2. 基底空Look-up Table

- Look-up Tableテクスチャ
  - 3D LUTテクスチャに全方向の空からの放射輝度が格納される。
    - 事前計算された高品質な空レンダリング結果を保持できる。
    - 単一の天候状態に対応。
  - **時刻（太陽高度）方向 (1D)**と**全球方向 (2D)**についてアダプティブにマッピング、テクスチャ解像度を節約。
    - 時刻（太陽高度）方向：　64
    - 全球方向：　32 x 128
    - フォーマット：　RGB10,10,11 Float
      - 一枚当たり晴LUTで約1.0 MiB、曇LUTで約0.25 MiB

POLYPHONY™ DIGITAL

2. 基底空Look-up Table

- Look-up Tableテクスチャ
  - 以下のように並ぶ。

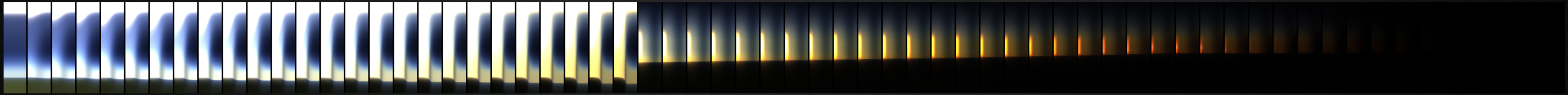


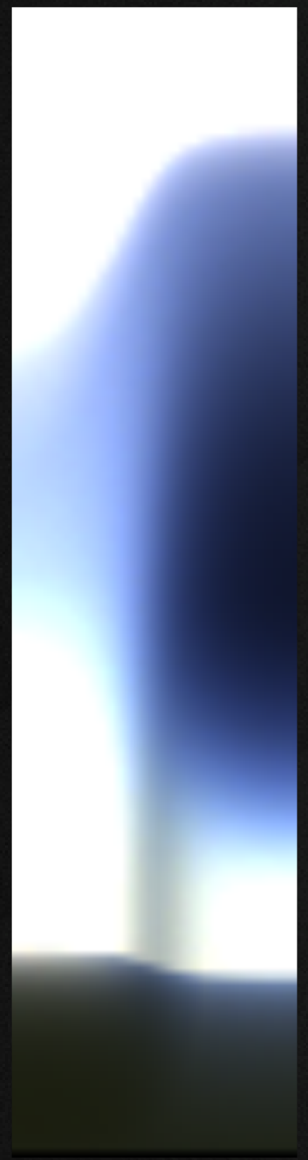
POLYPHONY DIGITAL

2. 基底空Look-up Table

- Look-up Tableテクスチャ
  - 以下のように並ぶ。

時刻（太陽高度）方向、64枚





ある特定の時刻（太陽高度）に対応する、全球放射輝度

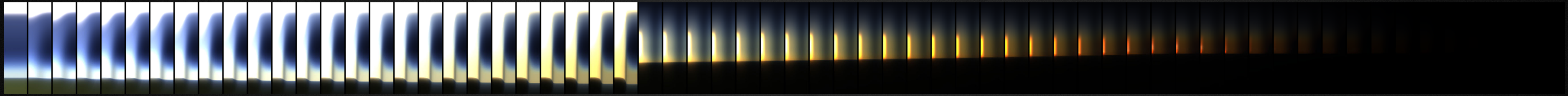
解像度32 x 128

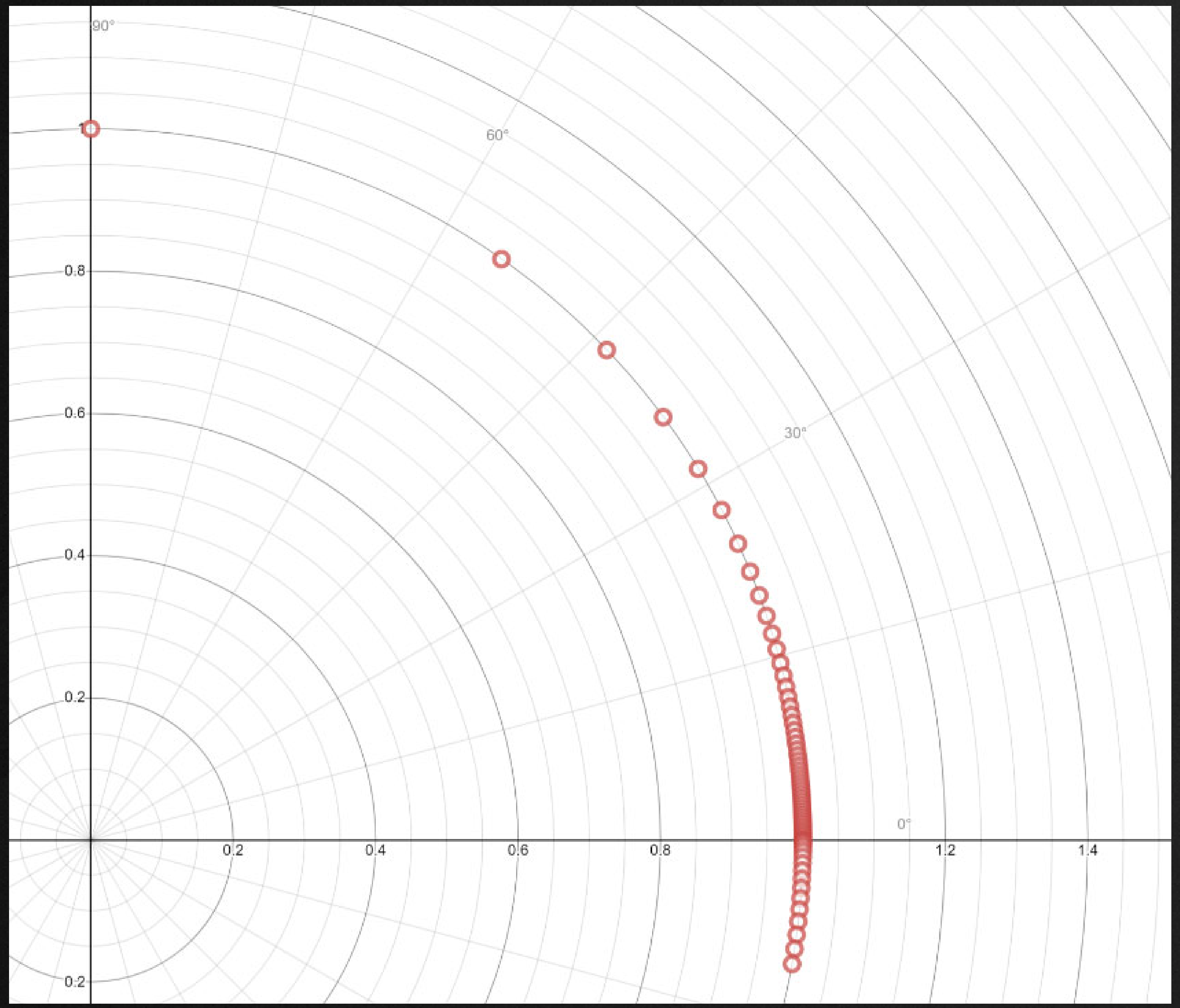
POLYPHONY DIGITAL

2. 基底空Look-up Table

- 時刻（太陽高度）についてのアダプティブマッピング
  - 水平線付近がたくさんサンプリングされるようにする。

時刻（太陽高度）方向、64枚





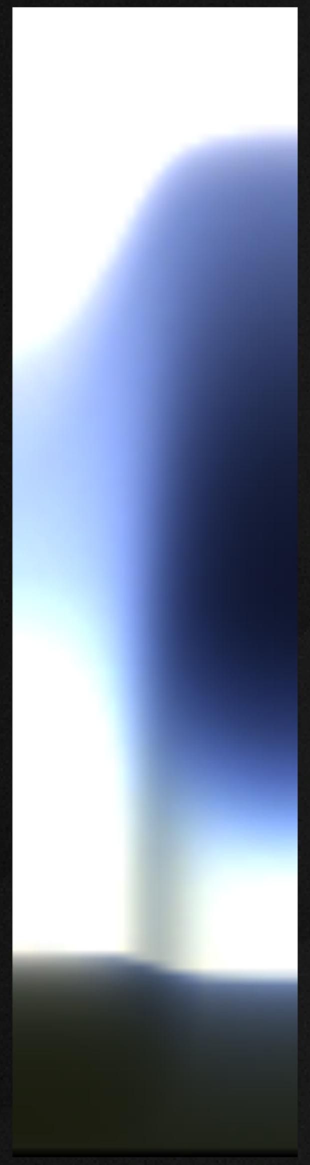
X軸が水平線方向、Y軸が直上に対応。
水平線付近のサンプル点が密になっている。

POLYPHONY DIGITAL

2. 基底空Look-up Table

- 全周方向についてのアダプティブマッピング
  - 太陽を中心にマッピングすることで時刻方向のLUTが多少スパースでも滑らかに補間できるようにする。
  - 太陽周辺と水平線方向に多くのテクセルが割り当てられるようにする。

太陽中心

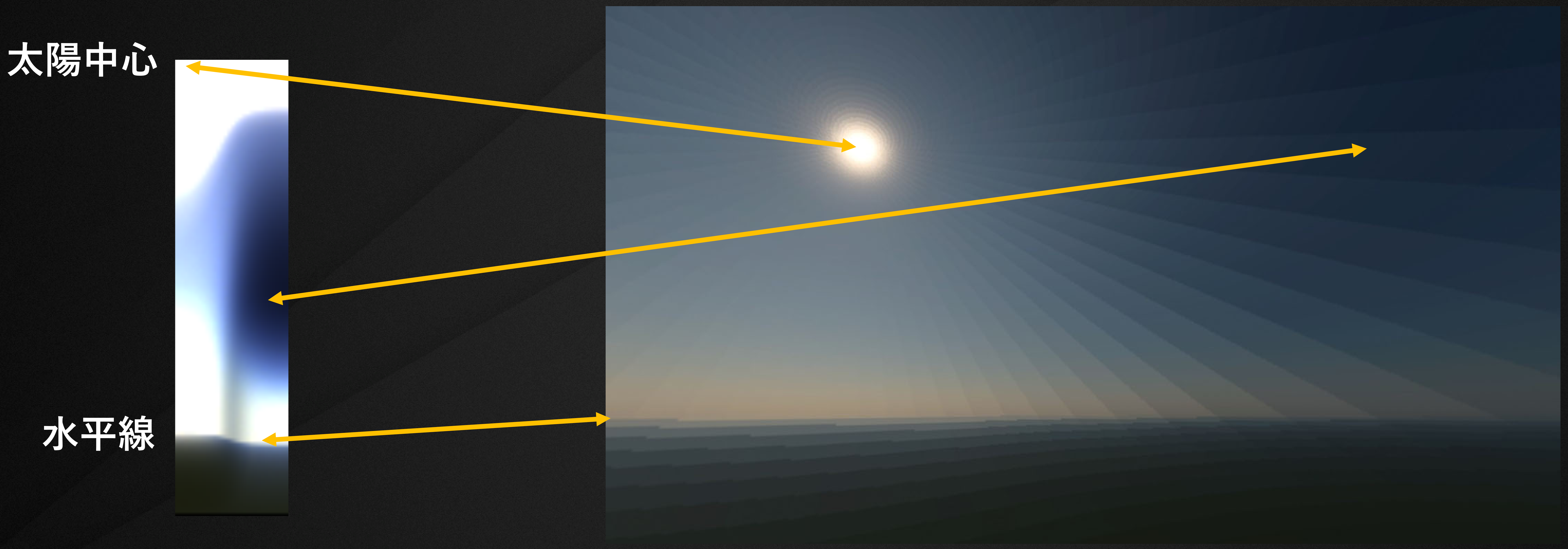


水平線

POLYPHONY™ DIGITAL

2. 基底空Look-up Table

- 全周方向についてのアダプティブマッピング
  - 太陽を中心にマッピングすることで時刻方向のLUTが多少スパースでも滑らかに補間できるようにする。
  - 太陽周辺と水平線方向に多くのテクセルが割り当てられるようにする。



LUTのテクセルを可視化

POLYPHONY DIGITAL

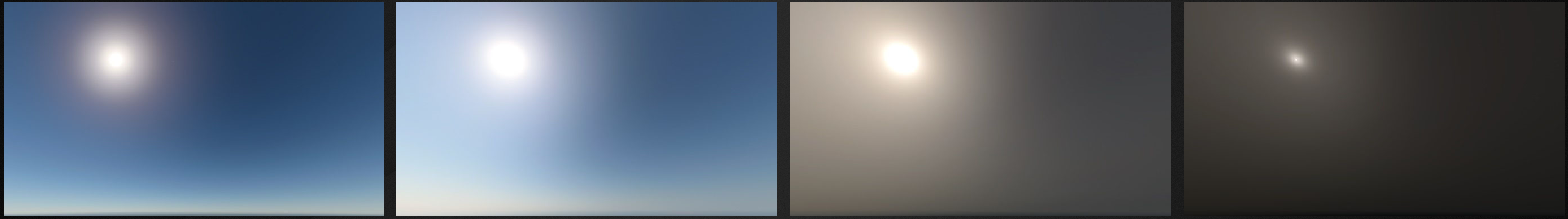
2. 基底空Look-up Table

- 天候の変化はLUTでどう表現するか？
- 今回、我々は様々な大気状態に応じた空を**基底空**と呼ぶことにした。晴天から曇天（雨）までの変化をこの基底空の組み合わせで表現する！
  - 全部で8枚の基底空3D LUTテクスチャを持つ。

POLYPHONY™ DIGITAL

2. 基底空Look-up Table

- **天候の変化はLUTでどう表現するか？**
- 今回、我々は様々な大気状態に応じた空を**基底空**と呼ぶことにした。晴天から曇天（雨）までの変化をこの基底空の組み合わせで表現する！
  - 全部で8枚の基底空3D LUTテクスチャを持つ。



快晴　晴　曇天

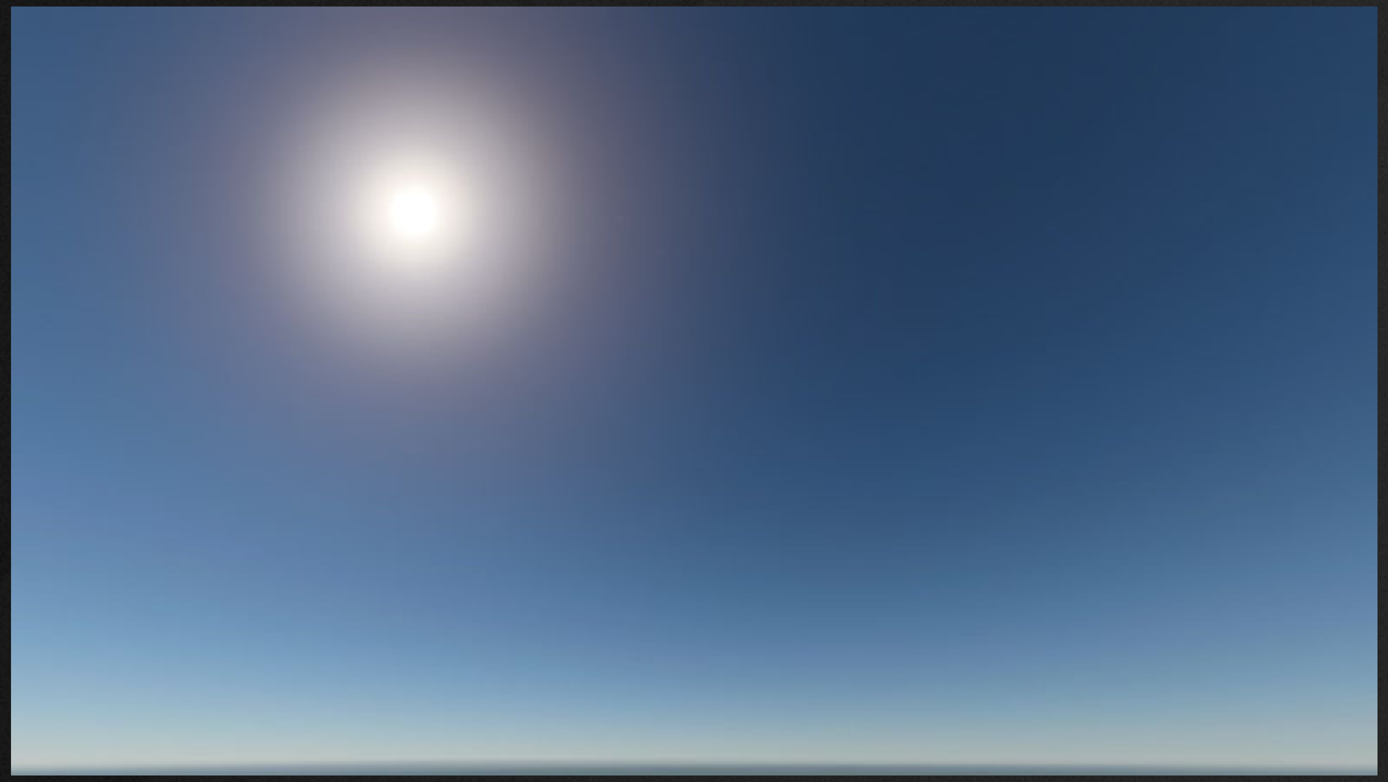
POLYPHONY DIGITAL

2. 基底空Look-up Table

- 晴天のための基底空
  - エアロゾル分布は二個の極端な分布のみ与える。
    - エアロゾルの多様性をclearとhazedの二個の基底の線形補間で表現する。
    - 一軸方向の制御になる。

2. 基底空Look-up Table

- 晴天のための基底空
  - エアロゾル分布は二個の極端な分布のみ与える。
    - エアロゾルの多様性をclearとhazedの二個の基底の線形補間で表現する。
    - 一軸方向の制御になる。



clear

hazed

2. 基底空Look-up Table

- 曇天（雨）のための基底空
  - 空を一様に灰色にするような高空の巨大な雲（高層雲）を曇天用の基底空として表現。
  - 高層雲の発生過程では散乱が急激に変化することから、細かく基底を用意（6個）することで補間精度が向上、自然な遷移となった。

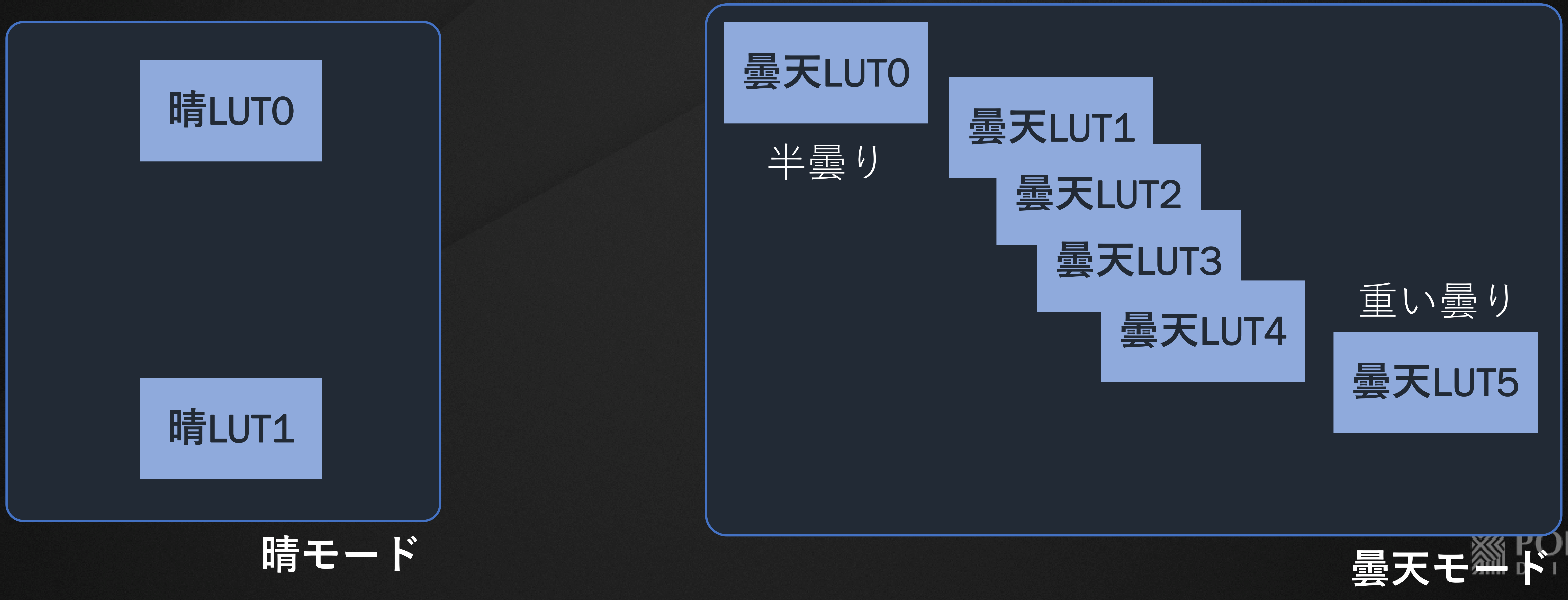
POLYPHONY™ DIGITAL

2. 基底空Look-up Table

- 曇天（雨）のための基底空
  - 空を一様に灰色にするような高空の巨大な雲（高層雲）を曇天用の基底空として表現。
  - 高層雲の発生過程では散乱が急激に変化することから、細かく基底を用意（6個）することで補間精度が向上、自然な遷移となった。

2. 基底空Look-up Table

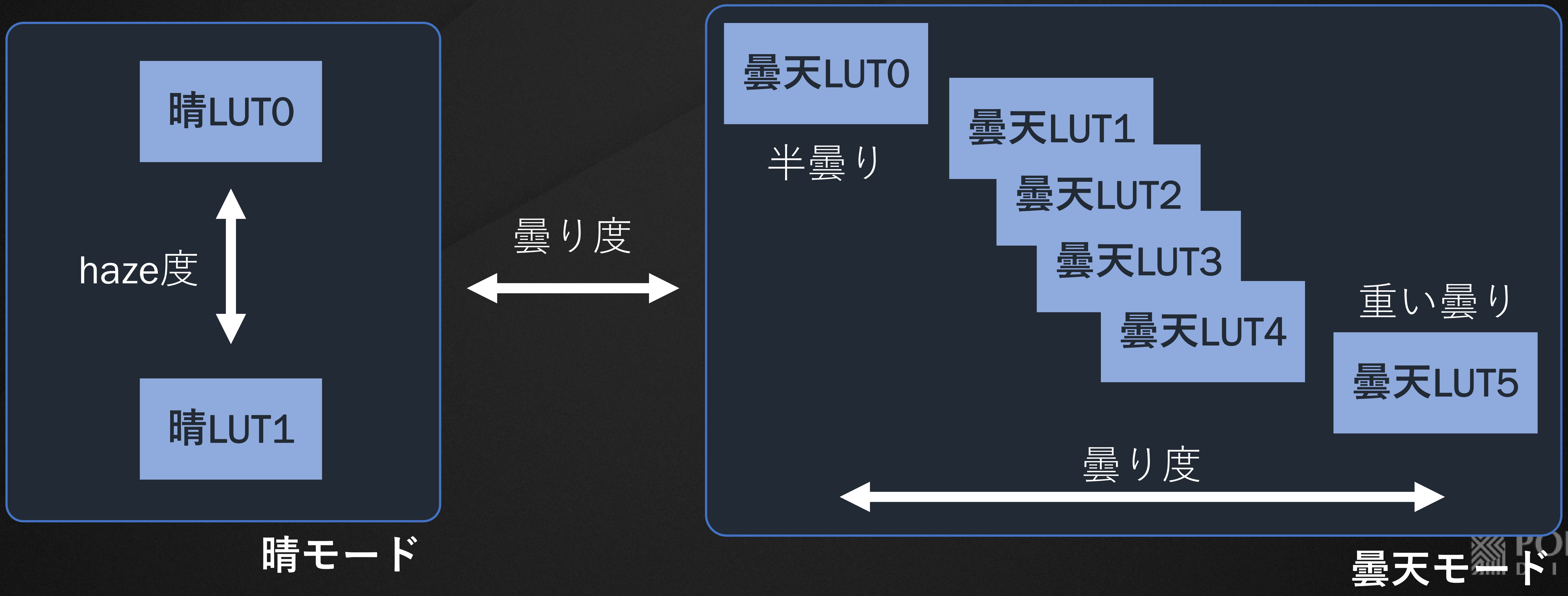
- 基底空LUTの補間
  - **晴天用の基底（2個）**と**曇天用の基底（6個）**を得たら、それらのレンダリング結果をLUTに変換する。
  - 各LUTを天候パラメータ（haze度、曇り度）に基づいて補間して、最終的なレンダリングに用いる。



POLYPHONY™ DIGITAL

2. 基底空Look-up Table

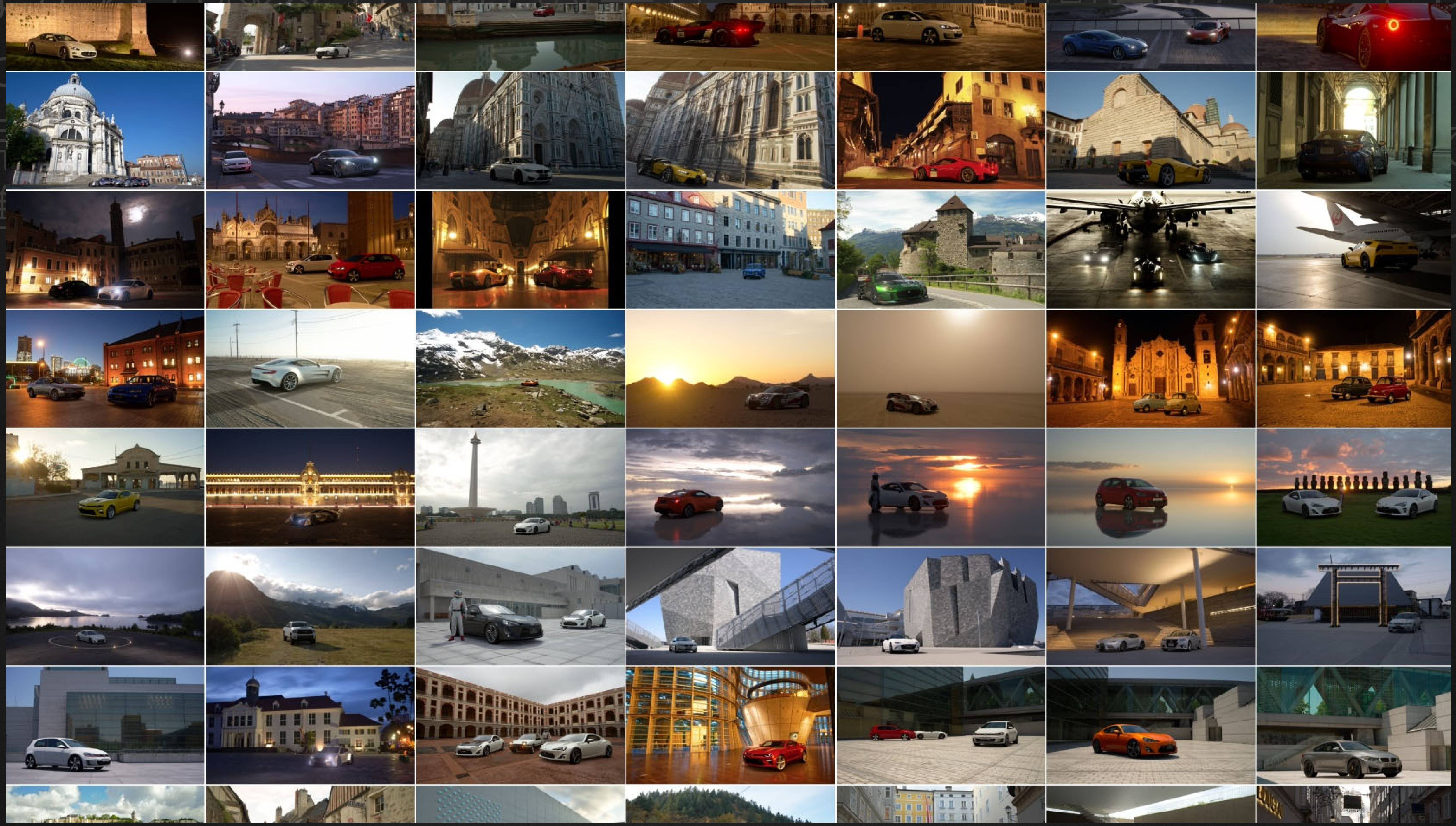
- **基底空LUTの補間**
  - **晴天用の基底（2個）**と**曇天用の基底（6個）**を得たら、それらのレンダリング結果をLUTに変換する。
  - 各LUTを天候パラメータ（haze度、曇り度）に基づいて補間して、最終的なレンダリングに用いる。



POLYPHONY™ DIGITAL

2. 基底空Look-up Table

- 基底空のバリデーション
  - 社内にはゲーム内コンテンツの素材として世界各地で取材された全周HDR写真が大量にある。（数千枚）
  - 断片的ながらも様々な地理的条件・天候・時間帯のリファレンスを利用できた
  - これら現 … できるかを判断基準 … た。



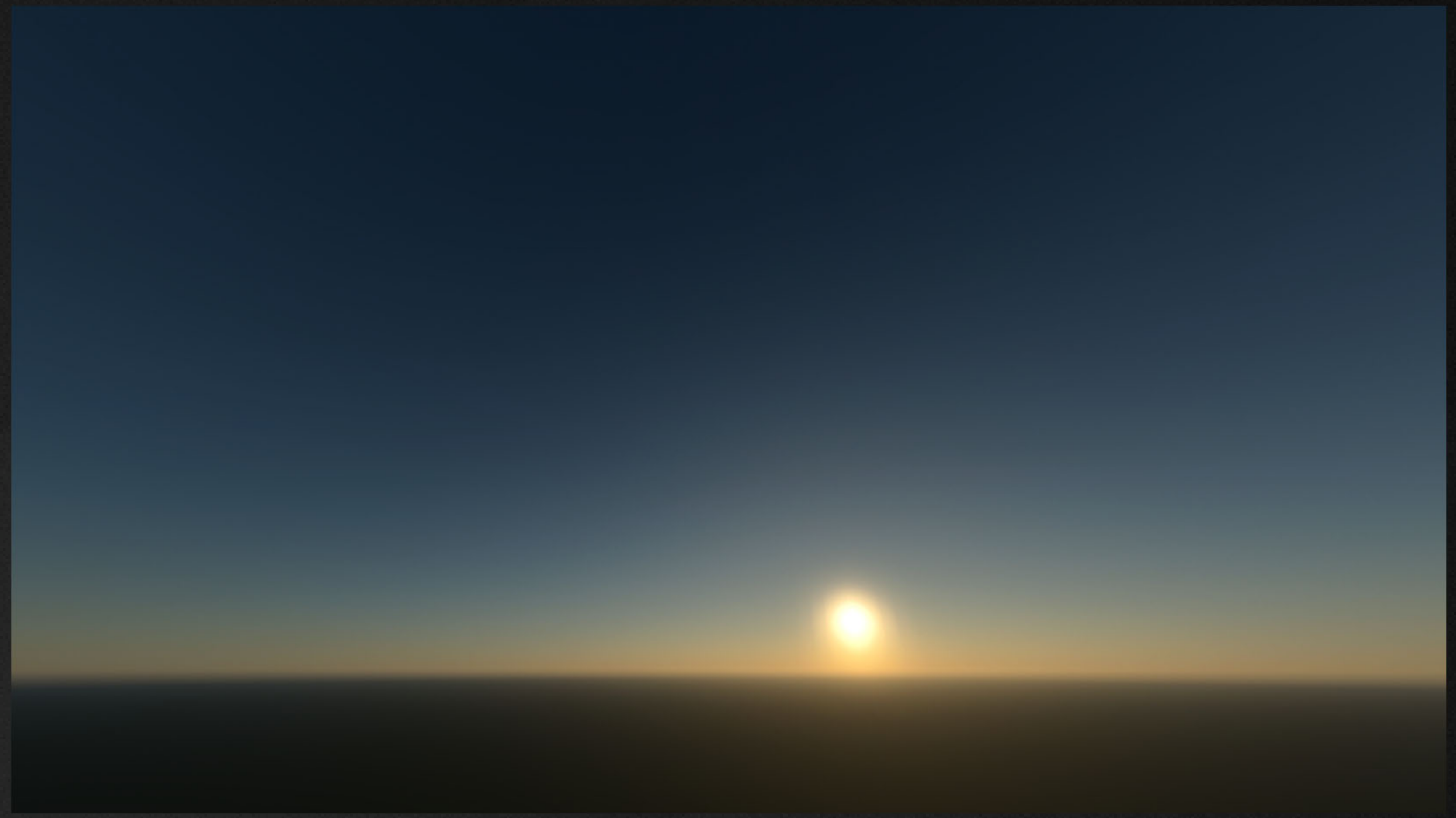
POLYPHONY™ DIGITAL

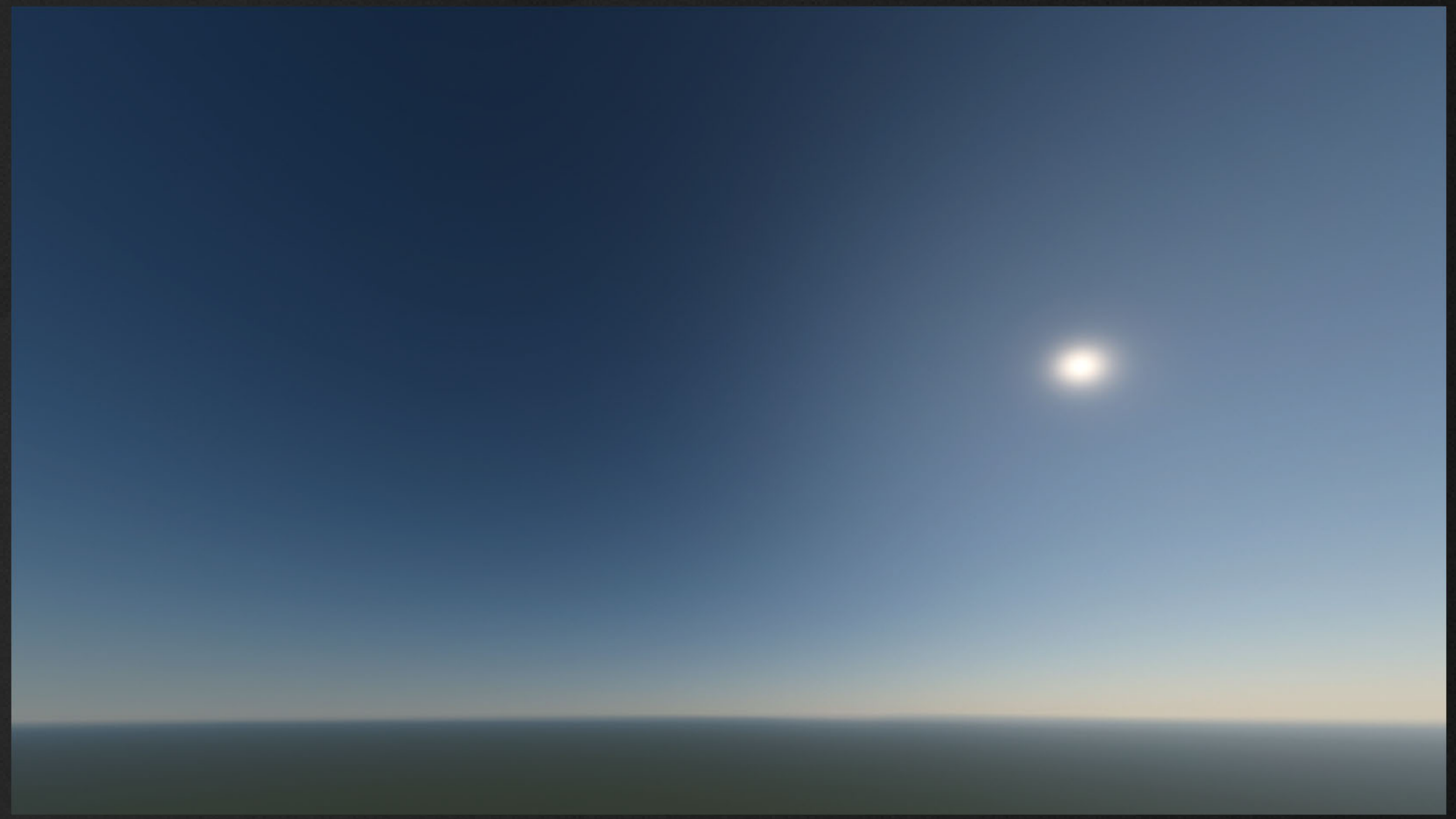
2. 基底空Look-up Table

- 基底空のバリデーション
  - 社内にはゲーム内コンテンツの素材として世界各地で取材された全周HDR写真が大量にある。（数千枚）
  - 断片的ながらも様々な地理的条件・天候・時間帯のリファレンスを利用できた。
  - これら現実の空にどれだけ幅広く精度よくフィッティングできるかを判断基準として、補間のしくみや基底空の大気状態を設定した。

実写HDR天球

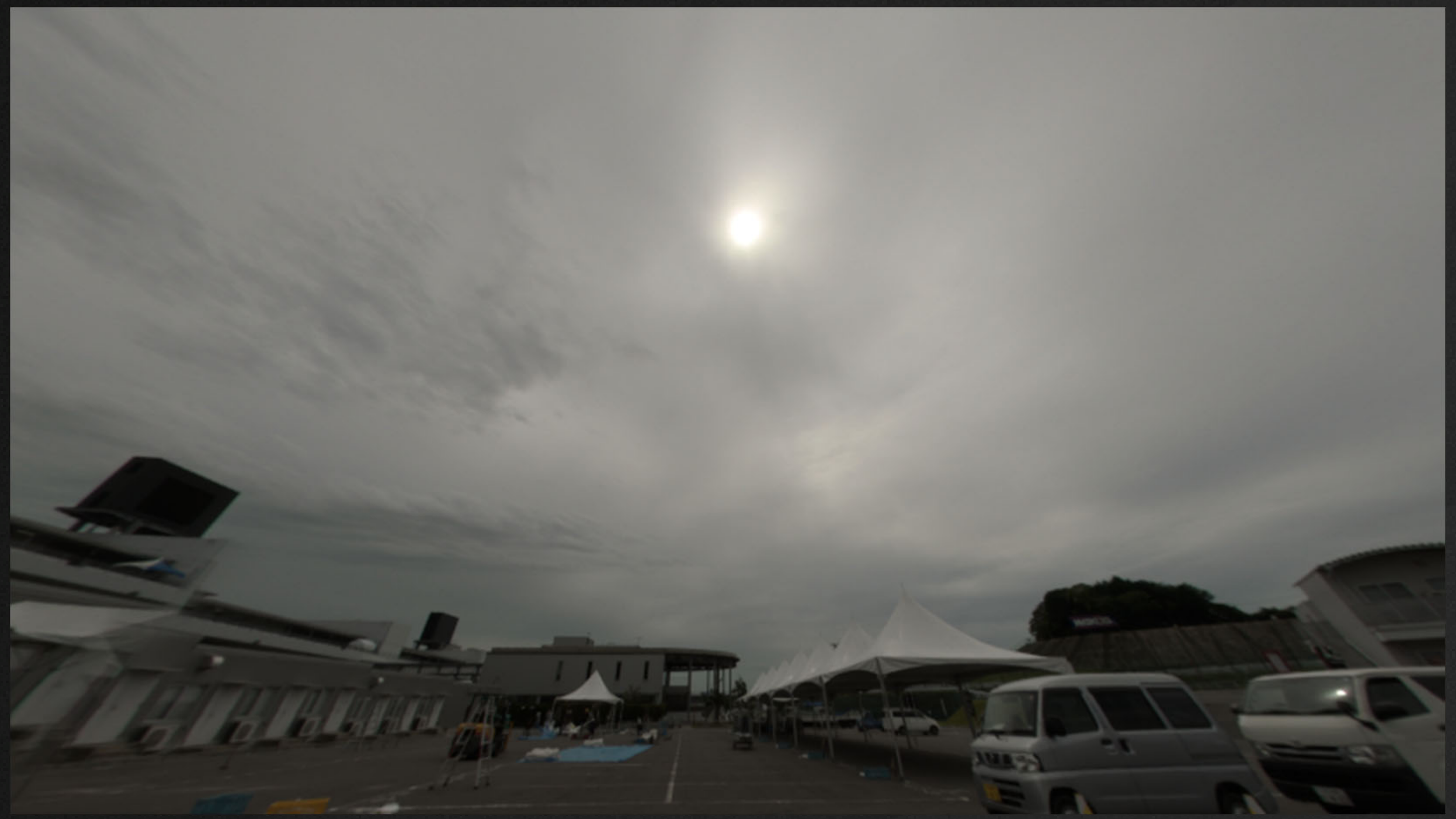
レンダリング結果



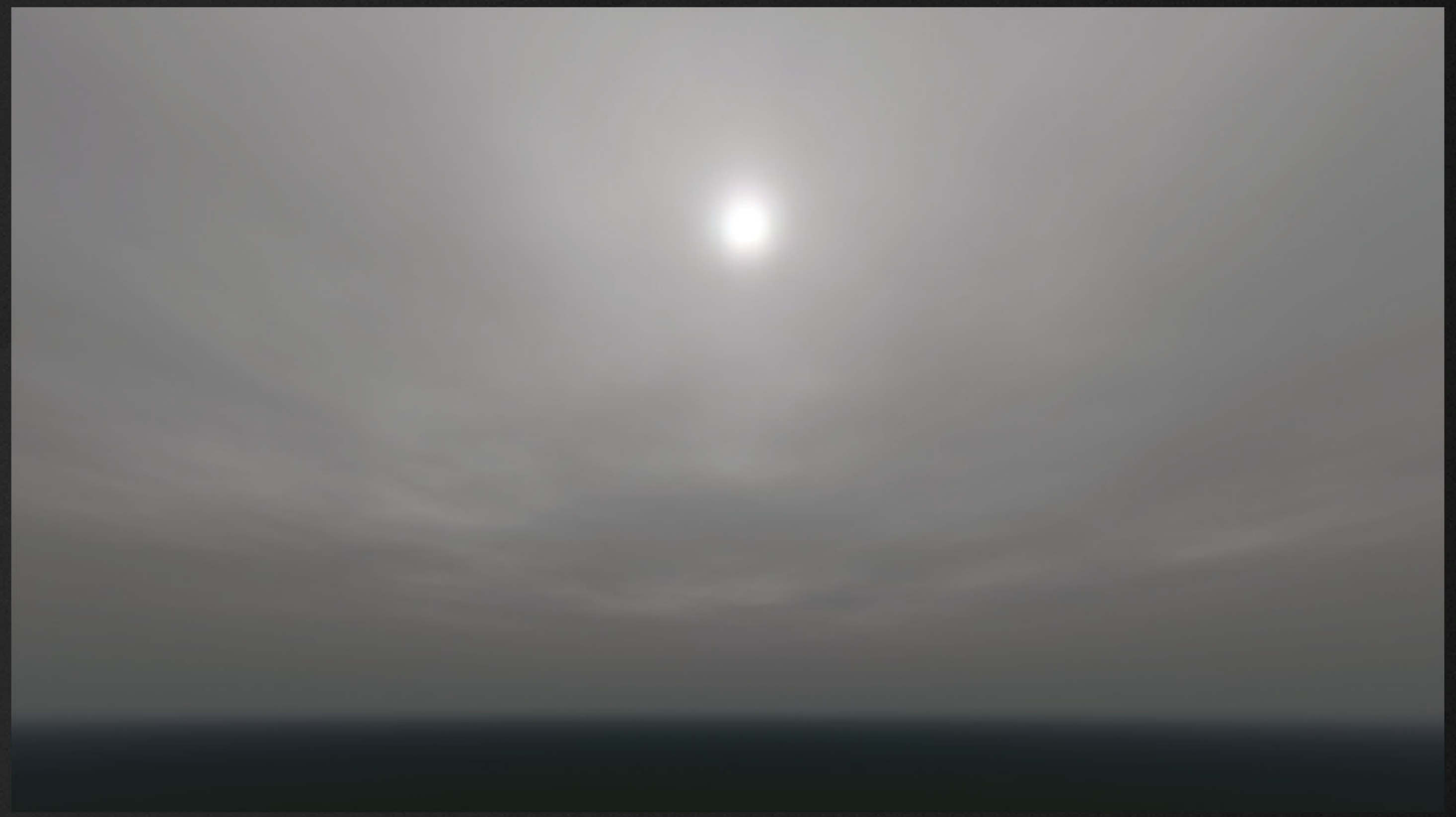


POLYPHONY™ DIGITAL

実写HDR天球



レンダリング結果



POLYPHONY™ DIGITAL

3. ゲーム中のLook-up Table

- ゲーム中は各基底空のLUTをComputeShaderを用いて補間。
- 補間済みLUTを用いてキューブマップに空をレンダリング、各所で利用。
  - 様々な方向の空が必要になるため、一度キューブマップにキャッシュすることでトータルの負荷を削減。

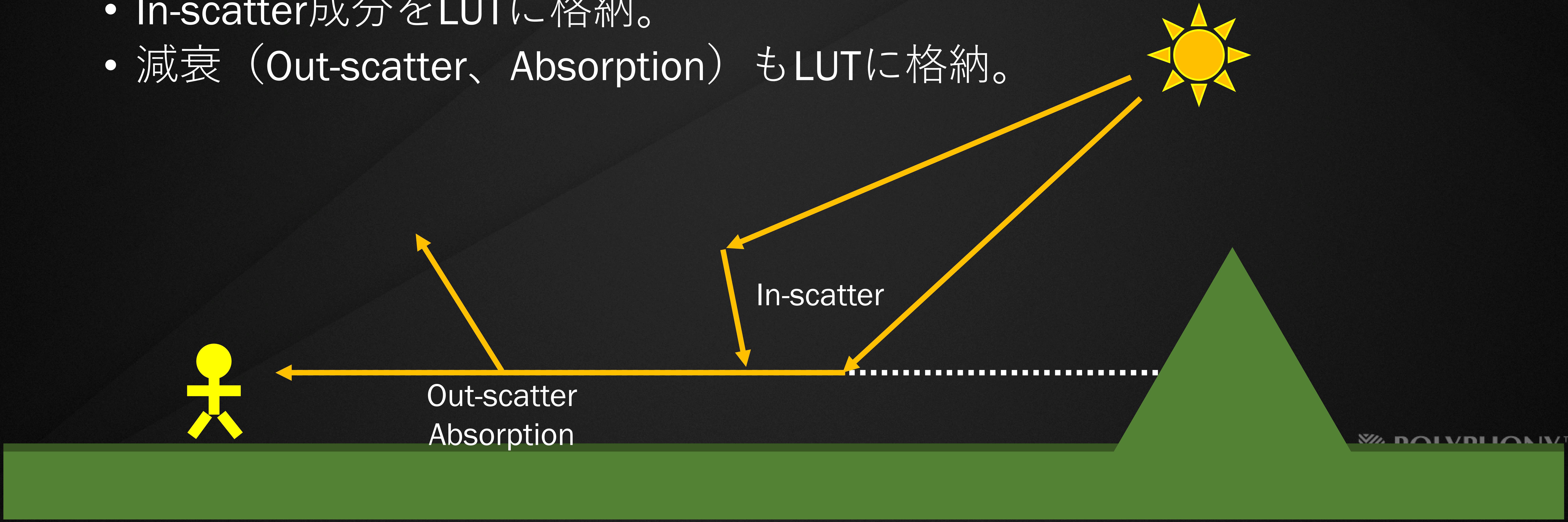
フォグ

フォグ

- フォグは大気散乱として計算可能。ただし空の場合と違って手前で打ち切られる。
- 無限遠においては、フォグは空と同じ輝度になる。よって、フォグの計算は空の大気モデルと一貫していてほしい。
  - In-scatter成分をLUTに格納。
  - 減衰（Out-scatter、Absorption）もLUTに格納。

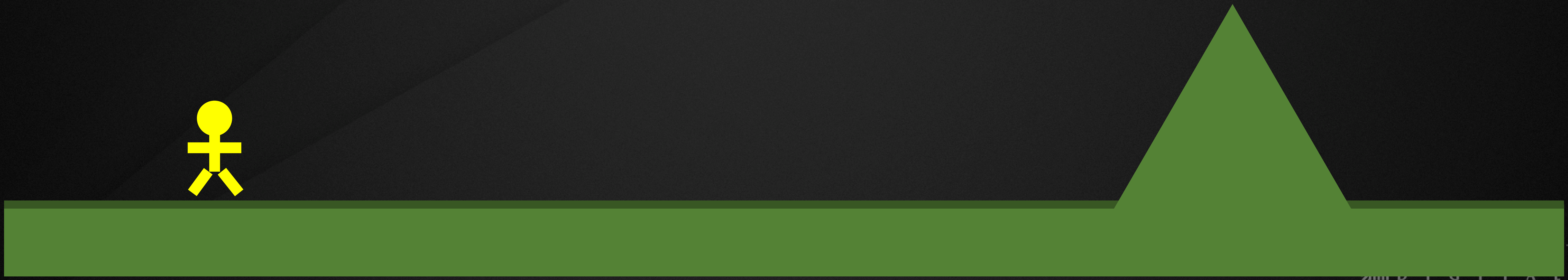
フォグ

- フォグは大気散乱として計算可能。ただし空の場合と違って手前で打ち切られる。
- 無限遠においては、フォグは空と同じ輝度になる。よって、フォグの計算は空の大気モデルと一貫していてほしい。
  - In-scatter成分をLUTに格納。
  - 減衰（Out-scatter、Absorption）もLUTに格納。



フォグ

- 問題点1
  - $fog = Coeff * \exp(-depth) * Sky_{LUT}$
  - 低い角度では距離が長すぎるため蓄積したout-scatterが色を変えてしまう。よって、無限遠基準の単純なexp減衰関数では近距離におけるin-scatter成分の誤差が大きくなる。
- 解決策
  - フォグ適用対象は雲より下の低高度にしか存在しないことに注目し、**低高度大気**のみ考慮したフォグ用のLUTを別途計算することで誤差を抑える。

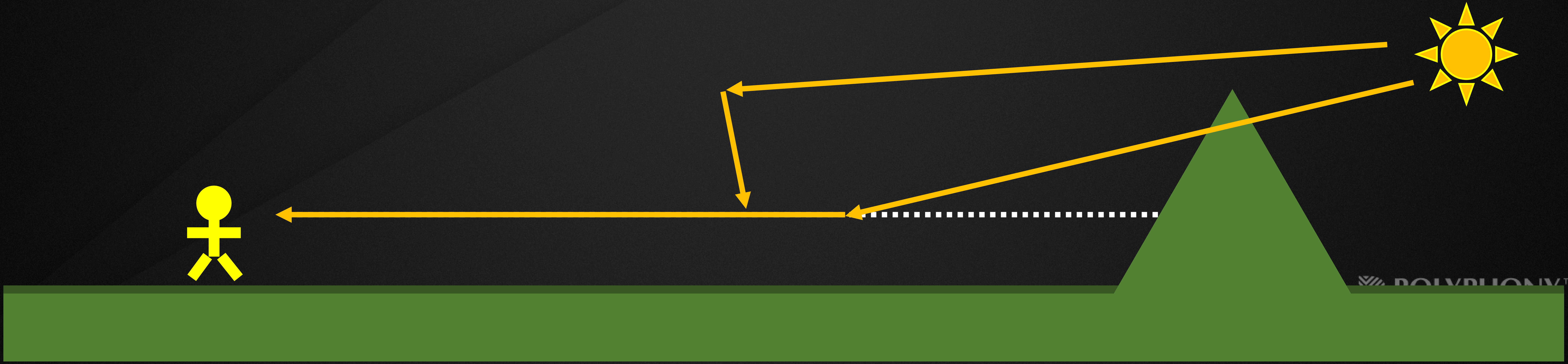


フォグ

- **問題点1**
  - $fog = Coeff * \exp(-depth) * Sky_{LUT}$
  - 低い角度では距離が長すぎるため蓄積したout-scatterが色を変えてしまう。よって、無限遠基準の単純なexp減衰関数では近距離におけるin-scatter成分の誤差が大きくなる。
- **解決策**
  - フォグ適用対象は雲より下の低高度にしか存在しないことに注目し、**低高度大気**のみ考慮したフォグ用のLUTを別途計算することで誤差を抑える。

フォグ

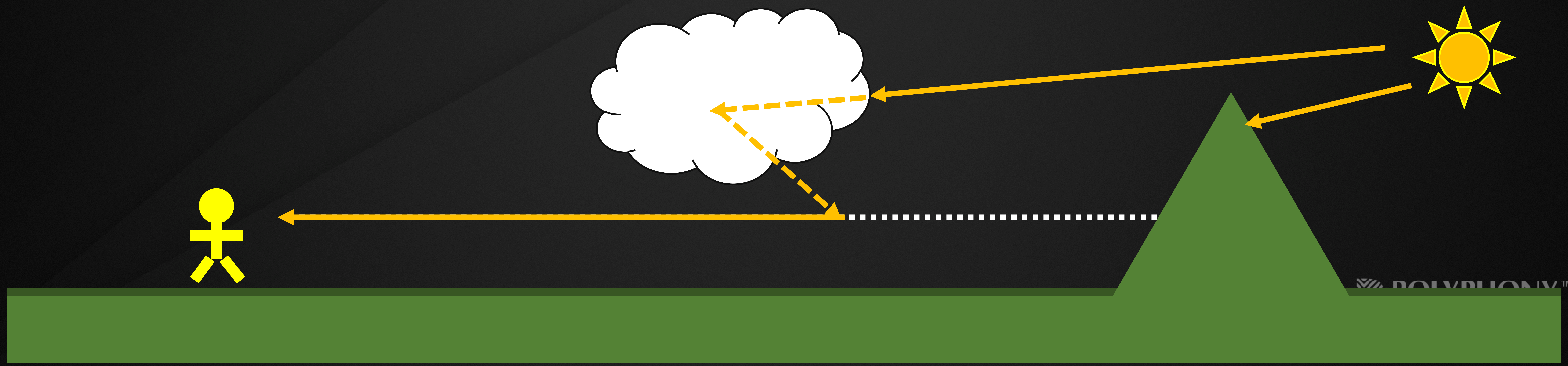
- 問題点2
  - 空LUTは地面による遮蔽のみ考慮した仮想地球上で計算しているため、雲や地形が存在する条件ではそれらの影がすべて無視され、in-scatter成分の誤差が大きくなる。
- 解決策
  - 影内のin-scatter成分として、直接光パスを除外して低高度大気内の間接光パスのみ抽出したフォグ用のLUTを計算。
    - 影外LUTをfog_light、影内LUTをfog_shadowとし、別途計算した雲による遮蔽度を用いて両LUTを補間。



POLYPHONY™

フォグ

- **問題点2**
  - 空LUTは地面による遮蔽のみ考慮した仮想地球上で計算しているため、雲や地形が存在する条件ではそれらの影がすべて無視され、in-scatter成分の誤差が大きくなる。
- **解決策**
  - 影内のin-scatter成分として、直接光パスを除外して低高度大気内の間接光パスのみ抽出したフォグ用のLUTを計算。
    - 影外LUTをfog_light、影内LUTをfog_shadowとし、別途計算した雲による遮蔽度を用いて両LUTを補間。



フォグ

- 最終的に二つのフォグ用LUTを用いて中遠景のフォグを計算。
  - フォグの色と遠近感は大幅に改善し、リファレンスにも近付いた。
- 結果的に雲の切れ間に印象的なライトシャフトが再現されることにもなった。

POLYPHONY™ DIGITAL

雲のレンダリング

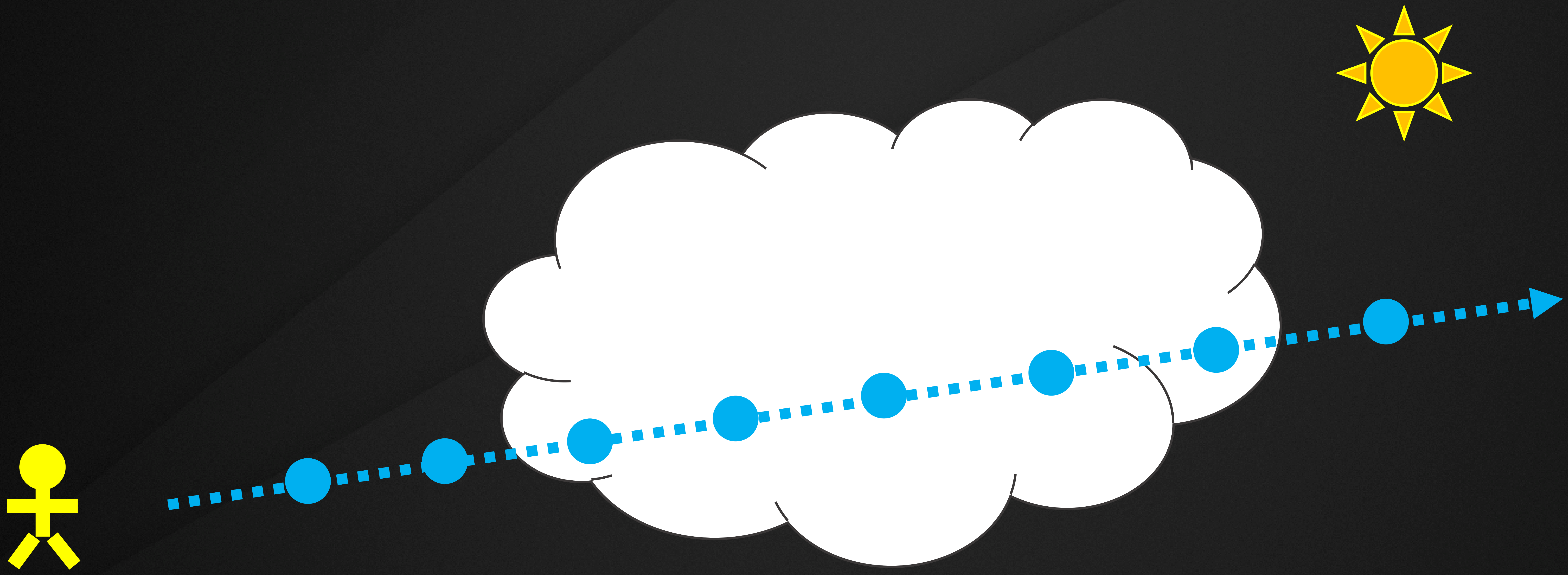
雲のレンダリング（概論）

- 空のレンダリング同様、ボリュームレンダリング方程式に基づいて散乱計算を行う。ただし、**ランタイムで行う**。
- 一般には、何らかのノイズによって定義された雲の密度場に対してレイマーチングを行うことで計算される。

POLYPHONY™ DIGITAL

雲のレンダリング（概論）

- 空のレンダリング同様、ボリュームレンダリング方程式に基づいて散乱計算を行う。ただし、**ランタイムで行う**。
- 一般には、何らかのノイズによって定義された雲の密度場に対してレイマーチングを行うことで計算される。

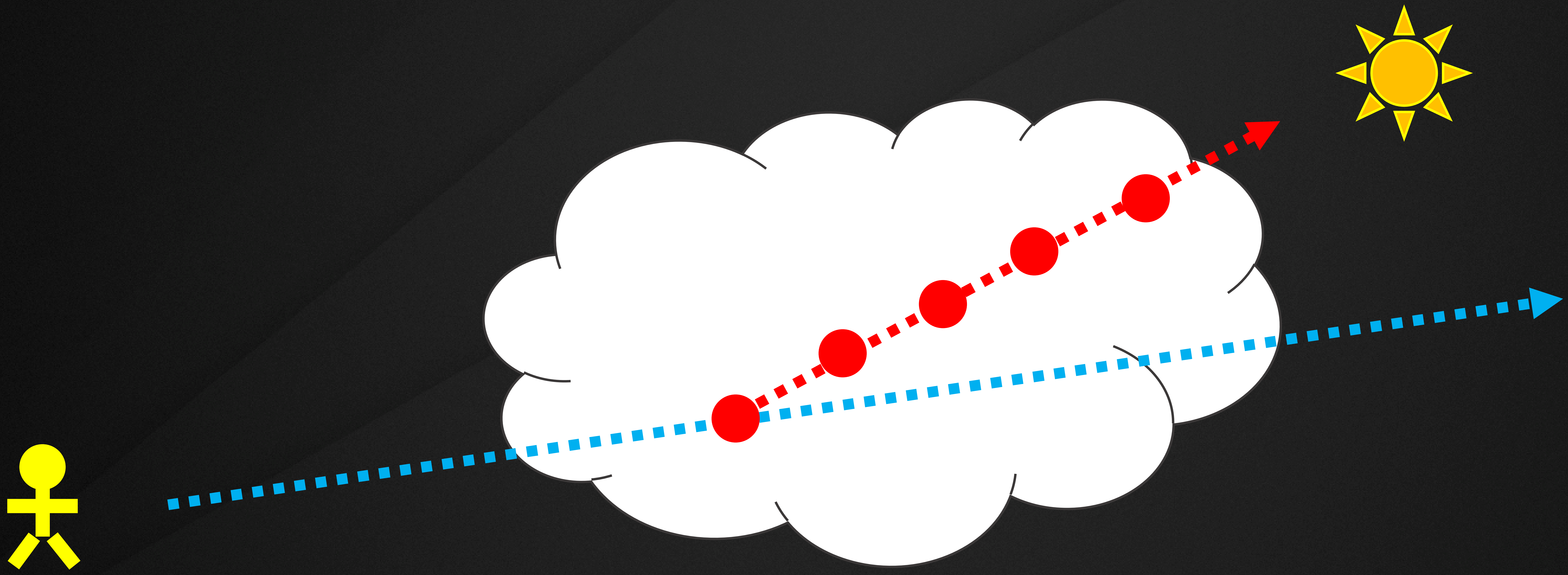


カメラからのレイマーチング

POLYPHONY™ DIGITAL

雲のレンダリング（概論）

- 空のレンダリング同様、ボリュームレンダリング方程式に基づいて散乱計算を行う。ただし、**ランタイムで行う**。
- 一般には、何らかのノイズによって定義された雲の密度場に対してレイマーチングを行うことで計算される。



太陽へのレイマーチング（寄与計算）

POLYPHONY™ DIGITAL

代表的な研究 [ゲーム、リアルタイムレンダリング]

- 2015, 2017　Nubis: Authoring Real-Time Volumetric Cloudscapes with the Decima Engine
  - Horizon: Zero Dawnで用いられたリアルタイム雲レンダリング手法。ノイズベースの雲モデリングとレイマーチングによるライティング。 [Schneider 2015, 2017]
- 2016　Physically Based Sky, Atmosphere & Cloud Rendering in Frostbite
  - Frostbiteにおけるリアルタイムの空・雲レンダリング手法[Hillaire 2016] 。[Schneider 2016]をベースにしている。
- 2019　Creating the Atmospheric World of Red Dead Redemption 2: A Complete and Integrated Solution
  - Red Dead Redemption 2で用いられたリアルタイム雲レンダリング手法[Bauer 2019] 。[Schneider 2015, 2017]をベースに、様々な改良が加えられている。

日本における発表

- 2017　『グランブルーファンタジー Project Re:LINK』の“雲”表現にかける並々ならぬこだわり [GCC]
- 2018　ゼノブレイド２のレイマーチングを使った雲表現 [CEDEC]
- 2019　エースコンバット7における”空の革新”について [CEDEC]

POLYPHONY™ DIGITAL

目標

- GT7における目標
  - PS4も含むためランタイムの計算コストをなるべく減らしたい。
  - メモリもあまり使いたくない。

POLYPHONY™ DIGITAL

目標

- GT7における目標
  - PS4も含むためランタイムの計算コストをなるべく減らしたい。
  - メモリもあまり使いたくない。

コアとなるアプローチは既存手法ベースのもの。
具体的な中身について今回は説明。
（モデリングとライティングに分けて説明）

POLYPHONY™ DIGITAL

雲のモデリング

POLYPHONY™
DIGITAL

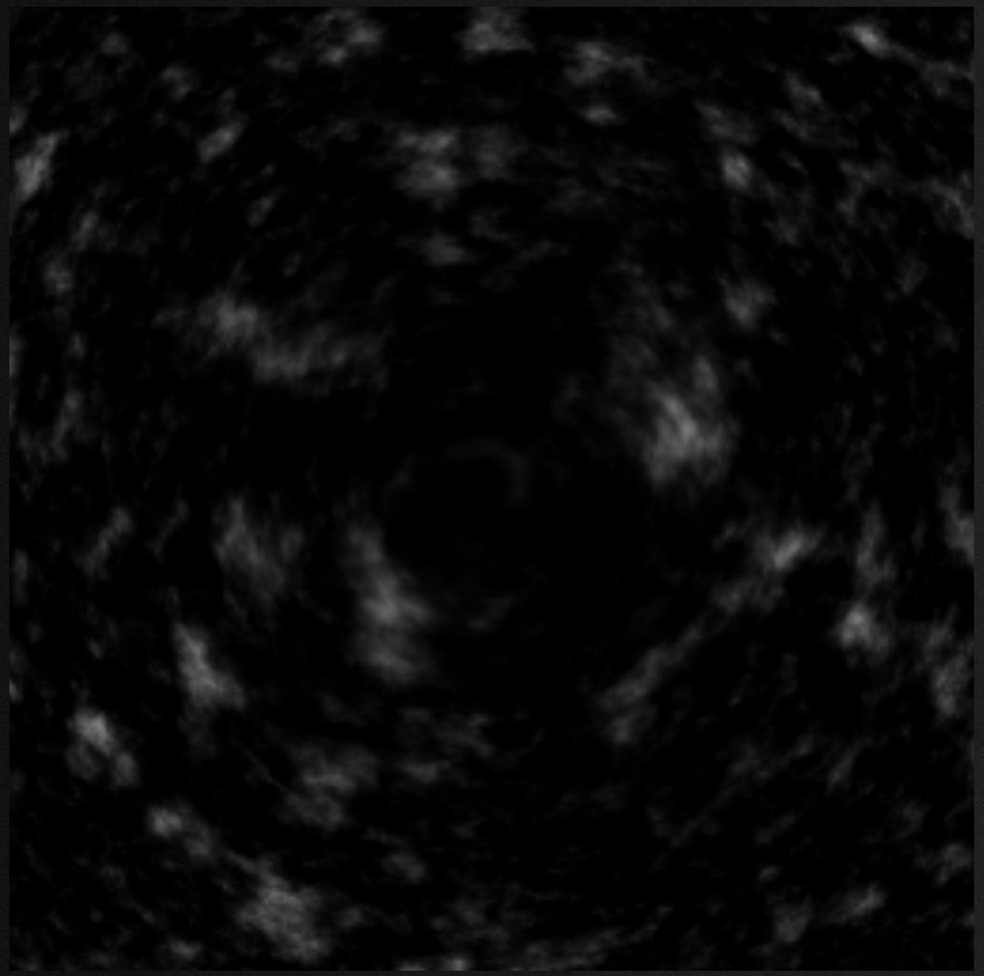
雲モデリング

- 今回、多様な「雲」のうち積雲のみレイマーチングで表現。
- 積雲は以下の3つのノイズを後述の Coverage Texture で合成してモデリングされている。

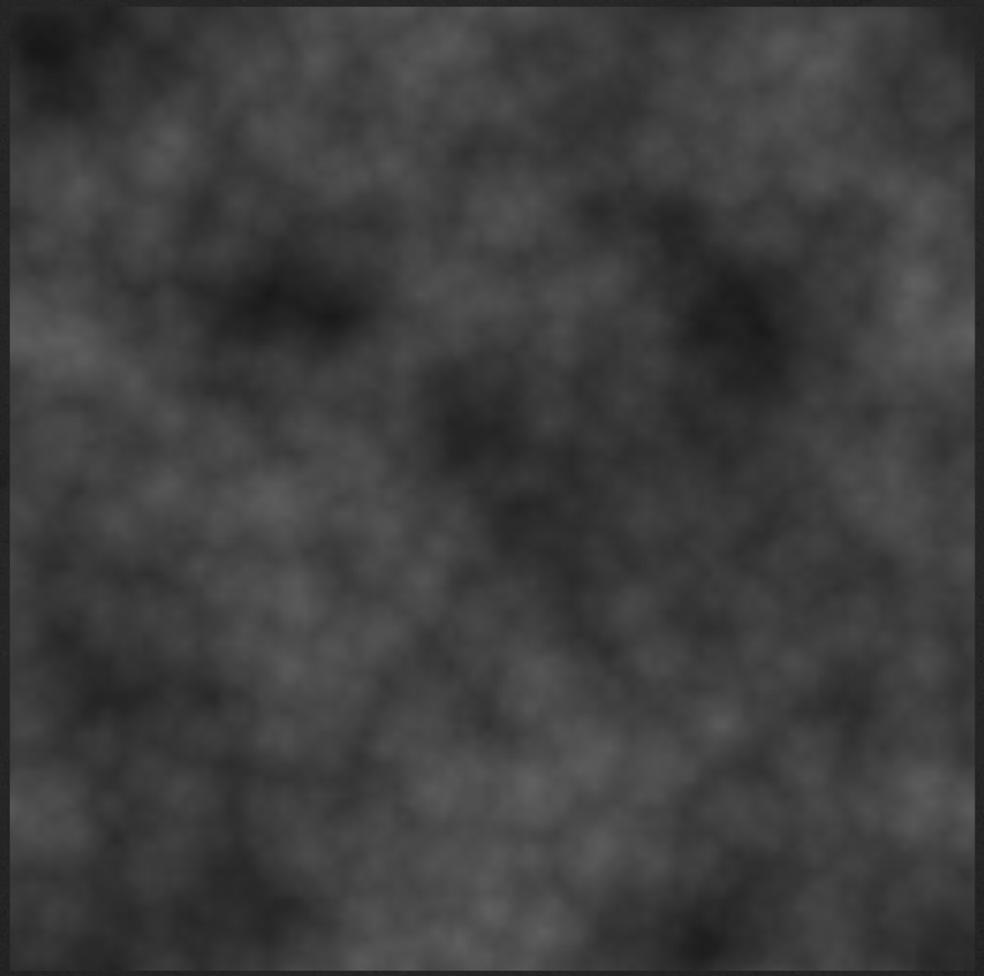
POLYPHONY™ DIGITAL

雲モデリング

- 今回、多様な「雲」のうち積雲のみレイマーチングで表現。
- 積雲は以下の3つのノイズを後述の Coverage Texture で合成してモデリングされている。



積雲マップ(2D)



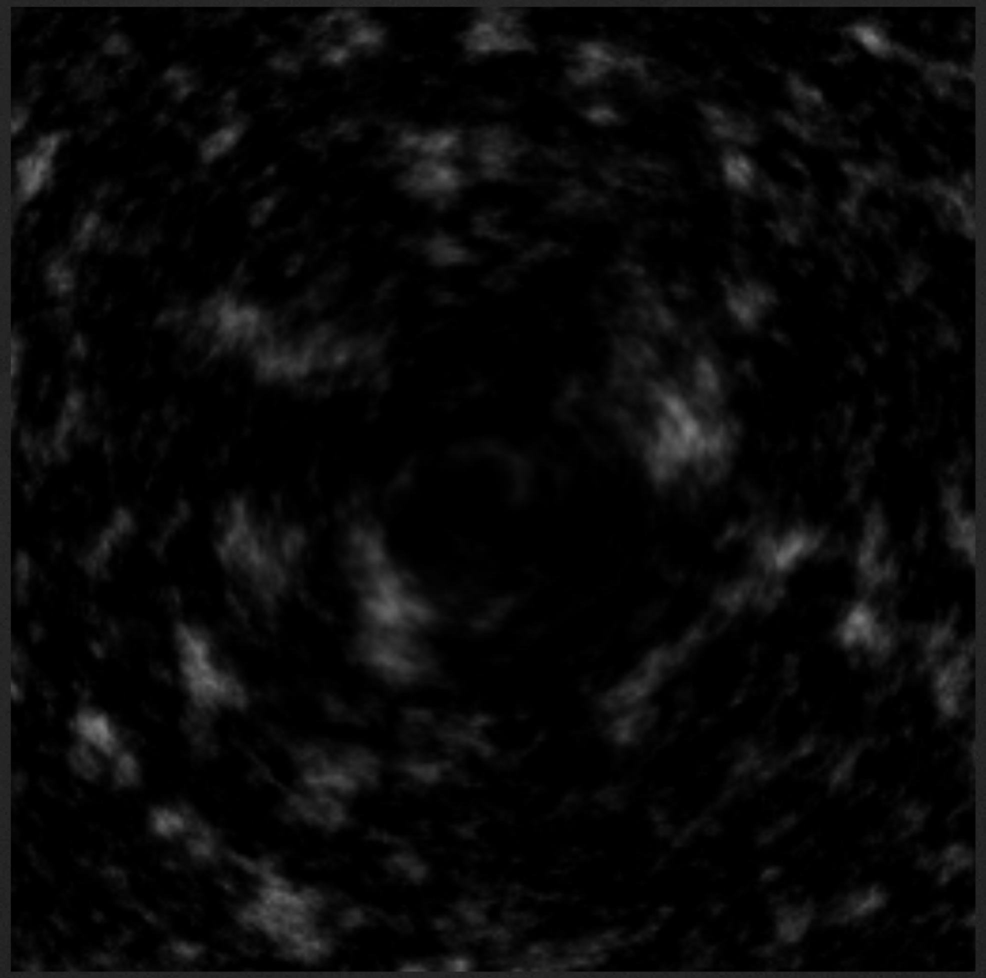
低周波ノイズ(3D)

高周波ノイズ(3D)

POLYPHONY™ DIGITAL

雲モデリング

- 積雲マップ(2D)
  - 別途実装されている気象システムが生成する 240km平方の Perlin Noise ベースのノイズ。
  - 風によって移流し、このマップが雲の分布の基本となる。解像度は非線形に最適化され、端にいくほど解像度が低下する。

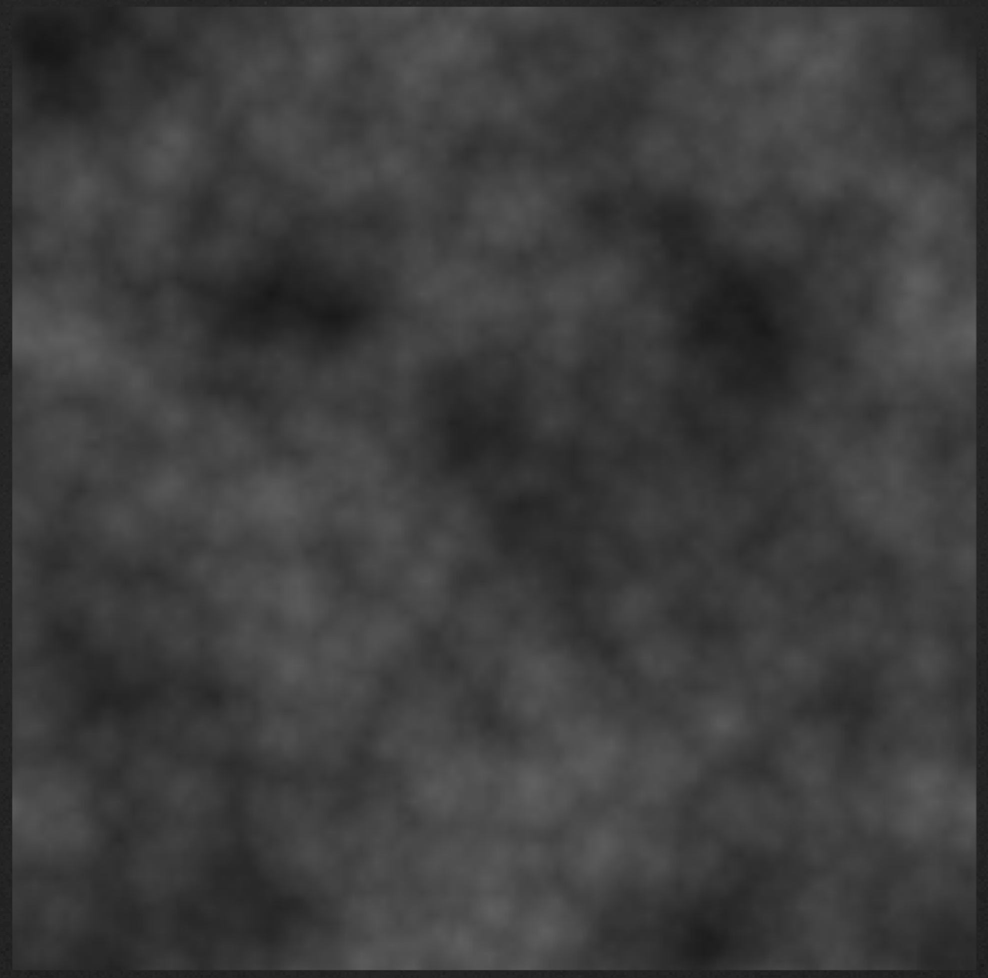


積雲マップ(2D)

POLYPHONY DIGITAL

雲モデリング

- 低周波ノイズ(3D)
  - 乱流による雲のモコモコした輪郭を追加する解像度128の Perlin-反転 Worley Noise で、2km程度のスケール。
  - 小さな雲の輪郭は大部分がこのノイズに依存するのでモデリング的な性格も強く、周波数特性やガンマ、配合を細かく作り込んでいる。



低周波ノイズ(3D)

POLYPHONY DIGITAL

雲モデリング

- **高周波ノイズ(3D)**
  - 低周波ノイズより小さな乱流による輪郭付近の千切れたようなディテールを追加する解像度32のWorley Noise で、300m程度のスケール。
  - 周波数が高いのでバッファのエイリアシングも織り込んだ内容になっている。

高周波ノイズ(3D)

POLYPHONY™ DIGITAL

積雲マップ(2D) + Coverage Tex

積雲マップ(2D) + Coverage Tex + 低周波ノイズ(3D)

積雲マップ(2D) + Coverage Tex + 低周波ノイズ(3D) + 中周波ノイズ(3D)

積雲マップ(2D) + Coverage Tex + 低周波ノイズ(3D)＋中周波ノイズ(3D)＋高周波ノイズ(3D)

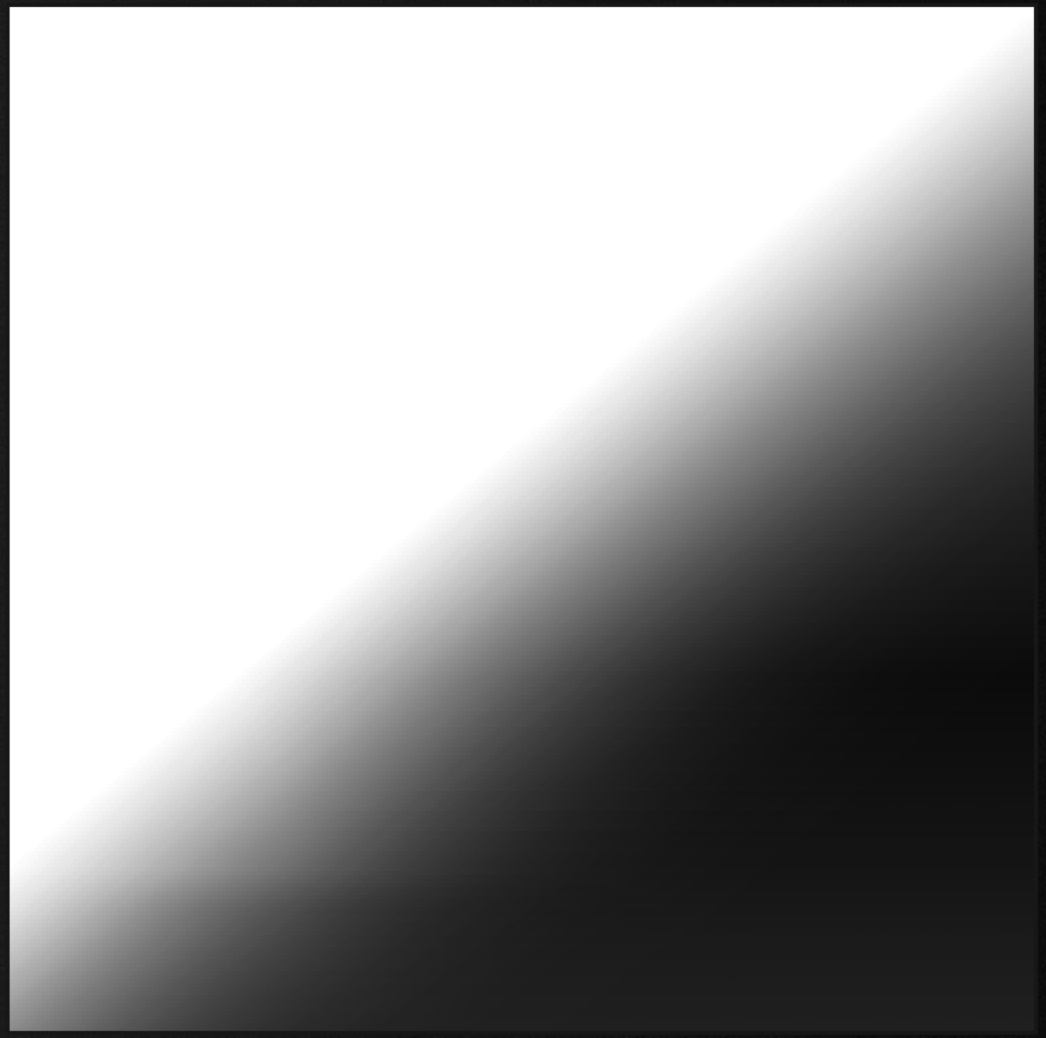
雲モデリング

- Coverage Texture
  - 以下の4chをRGBAにパックしている（最終解像度は 256x128）
  - 横軸が積雲マップ由来の密度、縦軸が高度に対応し、ノイズ(3D)と組み合わせて最終的な三次元密度場を生成する。

Height成分

低周波成分

中周波成分



アンビエント成分

POLYPHONY™ DIGITAL

雲のライティング

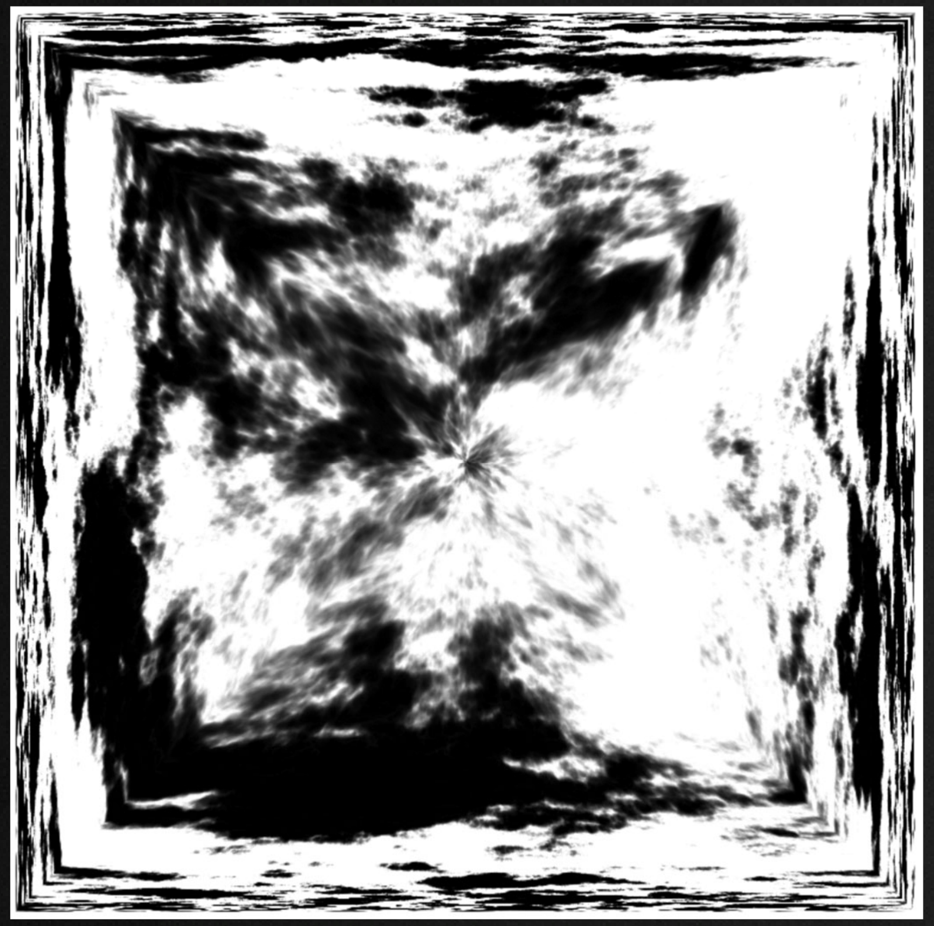
雲ライティング

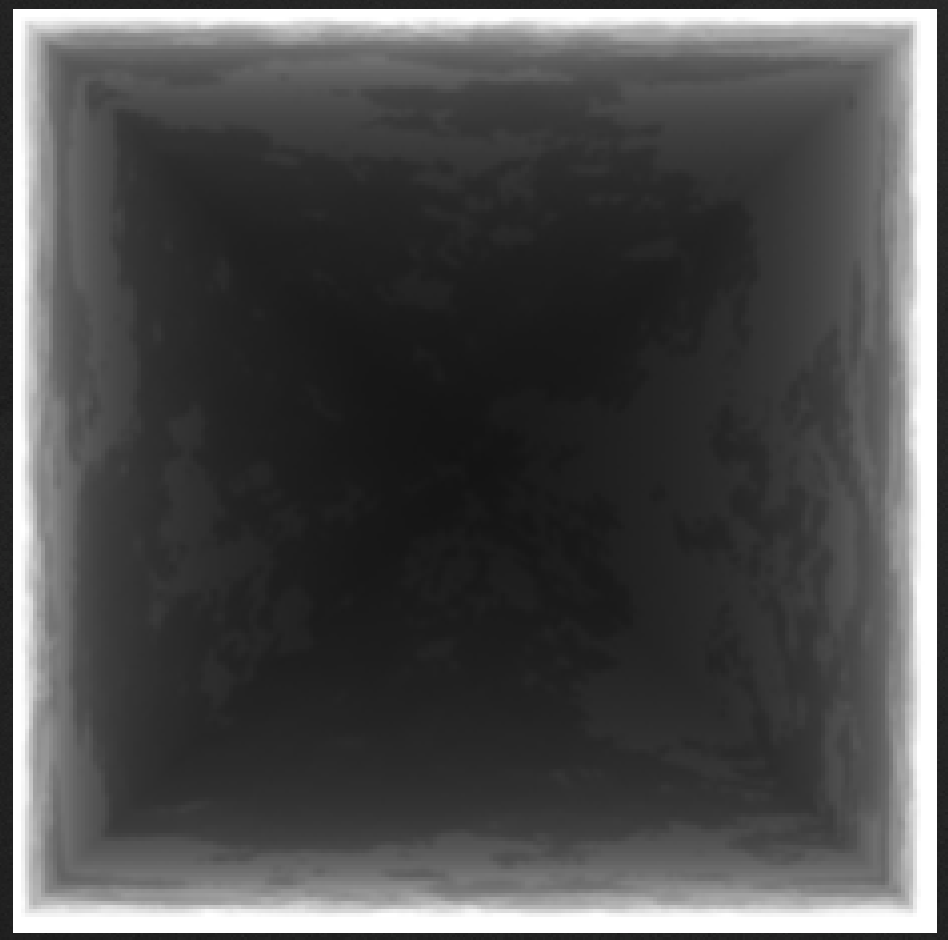
- 既存手法と同様のやり方でレイマーチングを行い雲の散乱計算。
- 以下のような**雲G-buffer**を計算（上半球）
  - レイマーチング自体は負荷分散のため複数フレームにまたがって計算されるため毎フレーム更新できない一方、ライティング自体は毎フレーム更新したい。よって要素分離する。
  - 各チャンネルにライティングに必要な情報を格納しておく。

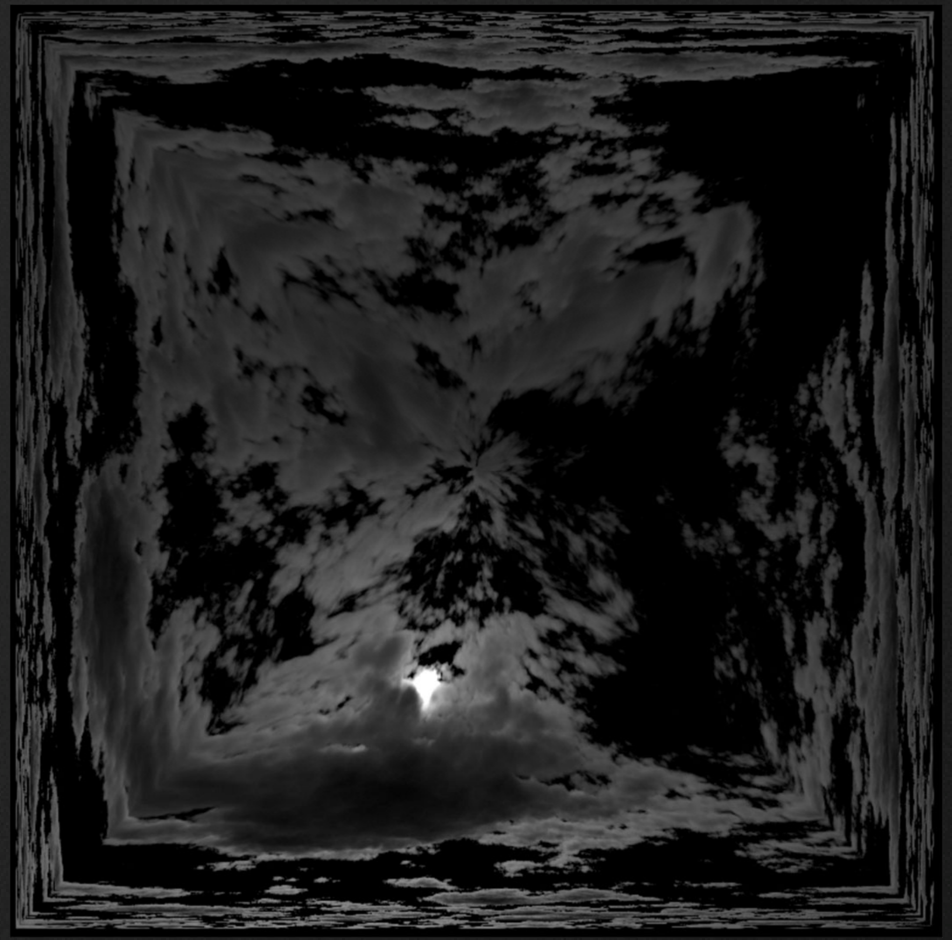
POLYPHONY™ DIGITAL

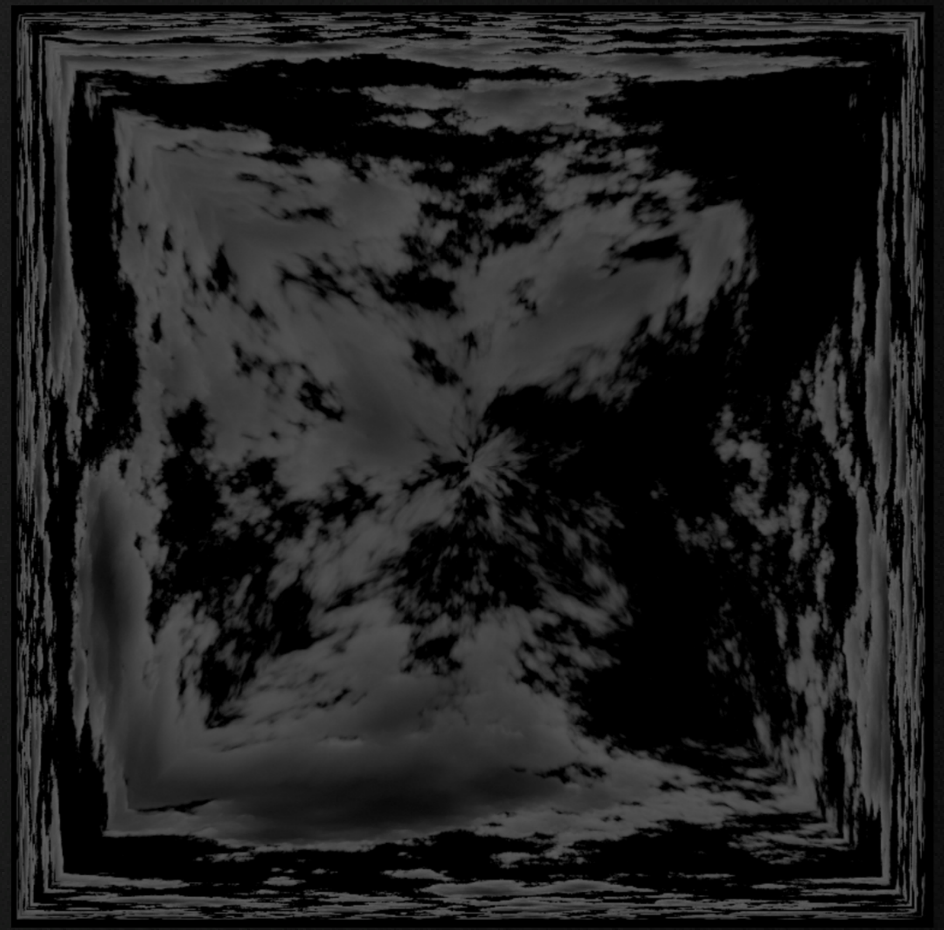
雲ライティング

- 既存手法と同様のやり方でレイマーチングを行い雲の散乱計算。
- 以下のような雲G-bufferを計算（上半球）
  - レイマーチング自体は負荷分散のため複数フレームにまたがって計算されるため毎フレーム更新できない一方、ライティング自体は毎フレーム更新したい。よって要素分離する。
  - 各チャンネルにライティングに必要な情報を格納しておく。


背景（空）に対する透過率


雲までの距離


太陽によるライティング（in-scatter）


アンビエントライティング

POLYPHONY™ DIGITAL

雲ライティング

- 雲G-bufferを用いてライティングを行う。
  - 太陽光によるSingle-scatteringを愚直に計算。
  - Multiple-scatteringは[Wrenninge et al. 2013]によるアドホック近似を採用。

Single-scatteringのみ

Multiple-scattering追加

POLYPHONY™ DIGITAL

パフォーマンス

- 雲のレイマーチングのためのフレームごとの予算は僅か（特にPS4）。そこで、数秒かけてレイマーチングを行い雲G-bufferを生成している。
  - async computeを利用して他の処理と重ねる。
- 雲の平行移動アニメーションは平面方向にUVワーピングすることで、毎フレーム反映。
- ライティングはG-bufferを用いることで、やはり毎フレーム反映。

POLYPHONY™ DIGITAL

まとめ

POLYPHONY™ DIGITAL

まとめ

- 時間天候変化をPS4/PS5で実現するために動的な空・雲レンダリングを実装した。
- 空のレンダリング
  - 複雑な大気モデルに基づいた大気散乱シミュレーション結果をLUT化することで高品質・高速な結果を達成した。
- 雲のレンダリング
  - 既存手法ベースのレイマーチングによるモデリングとライティング。
  - 時間方向に分散レンダリングすることで計算を効率化した。

POLYPHONY DIGITAL

まとめ

- 時間天候変化をPS4/PS5で実現するために動的な空・雲レンダリングを実装した。
- 空のレンダリング
  - 複雑な大気モデルに基づいた大気散乱シミュレーション結果をLUT化することで高品質・高速な結果を達成した。
- 雲のレンダリング
  - 既存手法ベースのレイマーチングによるモデリングとライティング。
  - 時間方向に分散レンダリングすることで計算を効率化した。

POLYPHONY™ DIGITAL

まとめ

- 時間天候変化をPS4/PS5で実現するために動的な空・雲レンダリングを実装した。
- 空のレンダリング
  - 複雑な大気モデルに基づいた大気散乱シミュレーション結果をLUT化することで高品質・高速な結果を達成した。
- 雲のレンダリング
  - 既存手法ベースのレイマーチングによるモデリングとライティング。
  - 時間方向に分散レンダリングすることで計算を効率化した。

POLYPHONY DIGITAL

参考文献

- [Novák et al. 2018] Jan Novák, Iliyan Georgiev, Johannes Hanika, and Wojciech Jarosz. 2018. Monte Carlo Methods for Volumetric Light Transport Simulation. Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics - State of the Art Reports) 37, 2 (May 2018).
- [Nishita et al. 1993] Tomoyuki Nishita, Takao Sirai, Katsumi Tadamura, and Eihachiro Nakamae. 1993. Display of the Earth Taking into Account Atmospheric Scattering. In Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '93), Association for Computing Machinery, Anaheim, CA, 175–182. DOI:https://doi.org/10.1145/166117.166140
- [Nishita et al. 1996] Tomoyuki Nishita, Yoshinori Dobashi, and Eihachiro Nakamae. 1996. Display of Clouds Taking into Account Multiple Anisotropic Scattering and Sky Light. In Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '96), Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 379–386. DOI:https://doi.org/10.1145/237170.237277
- [Bruneton and Neyret 2008] Eric Bruneton and Fabrice Neyret. 2008. Precomputed Atmospheric Scattering. Computer Graphics Forum (2008). DOI:https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2008.01245.x
- [Hosek and Wilkie 2012] Lukas Hosek and Alexander Wilkie. 2012. An Analytic Model for Full Spectral Sky-Dome Radiance. ACM Trans. Graph. 31, 4 (July 2012). DOI:https://doi.org/10.1145/2185520.2185591
- [Hillaire 2020] Sébastien Hillaire. 2020. A Scalable and Production Ready Sky and Atmosphere Rendering Technique. Computer Graphics Forum 39, 4 (2020), 13–22. DOI:https://doi.org/https://doi.org/10.1111/cgf.14050
- [Wilkie et al. 2021] Alexander Wilkie, Petr Vevoda, Thomas Bashford-Rogers, Lukáš Hošek, Tomáš Iser, Monika Kolářová, Tobias Rittig, and Jaroslav Křivánek. 2021. A Fitted Radiance and Attenuation Model for Realistic Atmospheres. ACM Trans. Graph. 40, 4 (July 2021). DOI:https://doi.org/10.1145/3450626.3459758

POLYPHONY™ DIGITAL

参考文献

- [Novák 2014] Jan Novák, Andrew Selle, and Wojciech Jarosz. 2014. Residual Ratio Tracking for Estimating Attenuation in Participating Media. ACM Trans. Graph. 33, 6 (November 2014). DOI:https://doi.org/10.1145/2661229.2661292
- [cmfs] Colour & Vision Research Laboratory. http://cvrl.ucl.ac.uk/cmfs.htm
- [Krueger and Minzner 1976] A. Krueger and Raymond Minzner. 1976. A MidLatitude Ozone Model for the 1976 U.S. Standard Atmosphere. Journal of Geophysical Research 81, (August 1976), 4477–4481. DOI:https://doi.org/10.1029/JC081i024p04477
- [Omar et al. 2005] Ali H. Omar, Jae-Gwang Won, David M. Winker, Soon-Chang Yoon, Oleg Dubovik, and M. Patrick McCormick. 2005. Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 110, D10 (2005). DOI:https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2004JD004874
- [O3 Spectra] https://www.iup.uni-bremen.de/gruppen/molspec/databases/referencespectra/o3spectra2011/index.html
- [Bohren and Huffman, 1983] Craig Bohren and Donald Huffman. 1998. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. Wiley Science Paperback Series.
- [Schneider 2015] Andrew Schneider. 2015. The Real-time Volumetric Cloudscapes of Horizon: Zero Dawn. Advances in Real Time Rendering, Part I. In ACM SIGGRAPH 2015 Courses (SIGGRAPH ’15), Association for Computing Machinery, Los Angeles, California. DOI:https://doi.org/10.1145/2776880.2787701

POLYPHONY™ DIGITAL

参考文献

- [Schneider 2017] Andrew Schneider. 2017. Nubis: Authoring Real-Time Volumetric Cloudscapes with the Decima Engine. Advances in Real-Time Rendering, Part I. In ACM SIGGRAPH 2017 Courses (SIGGRAPH ’17), Association for Computing Machinery, Los Angeles, California. DOI:https://doi.org/10.1145/3084873.3096476
- [Hillaire 2016] Sébastien Hillaire. 2016. Physically Based Sky, Atmosphere & Cloud Rendering in Frostbite. Physically Based Shading in Theory and Practice. In ACM SIGGRAPH 2016 Courses (SIGGRAPH ’16), Association for Computing Machinery, Anaheim, California. DOI:https://doi.org/10.1145/2897826.2927353
- [Bauer 2019] Fabian Bauer. 2019. Creating the Atmospheric World of Red Dead Redemption 2: A Complete and Integrated Solution. Advances in Real-Time Rendering in Games, Part 2. In ACM SIGGRAPH 2019 Courses (SIGGRAPH ’19), Association for Computing Machinery, Los Angeles, California. DOI:https://doi.org/10.1145/3305366.3335036
- [Wrenninge et al. 2013] Magnus Wrenninge, Chris Kulla, and Viktor Lundqvist. 2013. Oz: The Great and Volumetric. In ACM SIGGRAPH 2013 Talks (SIGGRAPH ’13), Association for Computing Machinery, Anaheim, California. DOI:https://doi.org/10.1145/2504459.2504518

路面・芝生の
メソスケール材質表現

平井 健太朗

POLYPHONY™ DIGITAL

路面・芝生の材質表現

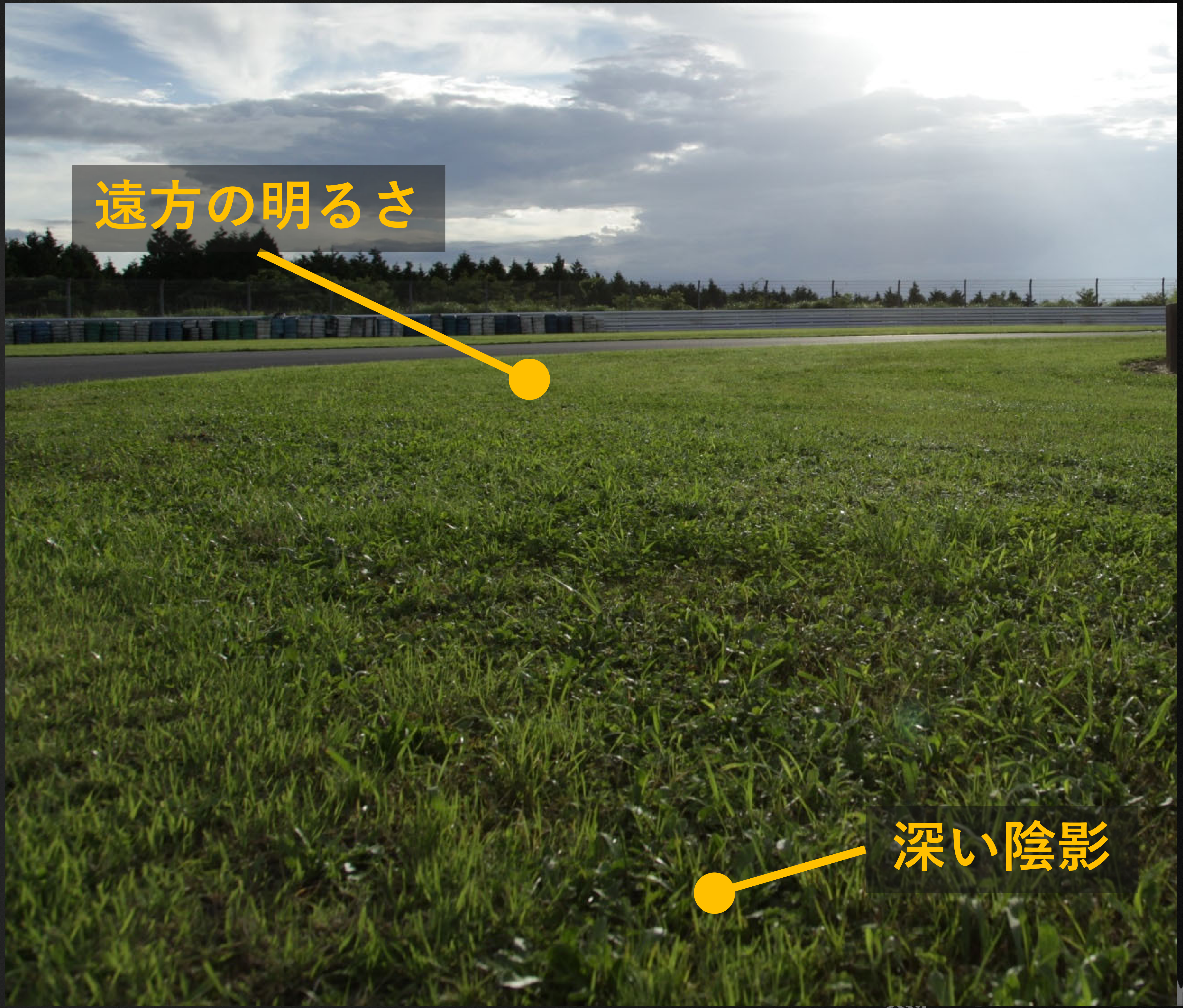
GT7では路面・芝生に対して専用のシェーダーを導入することになった。

- 空と同様に画面面積の多くを占め、重要度が高い。
- 表面の凹凸による特徴的な見た目。

POLYPHONY™ DIGITAL

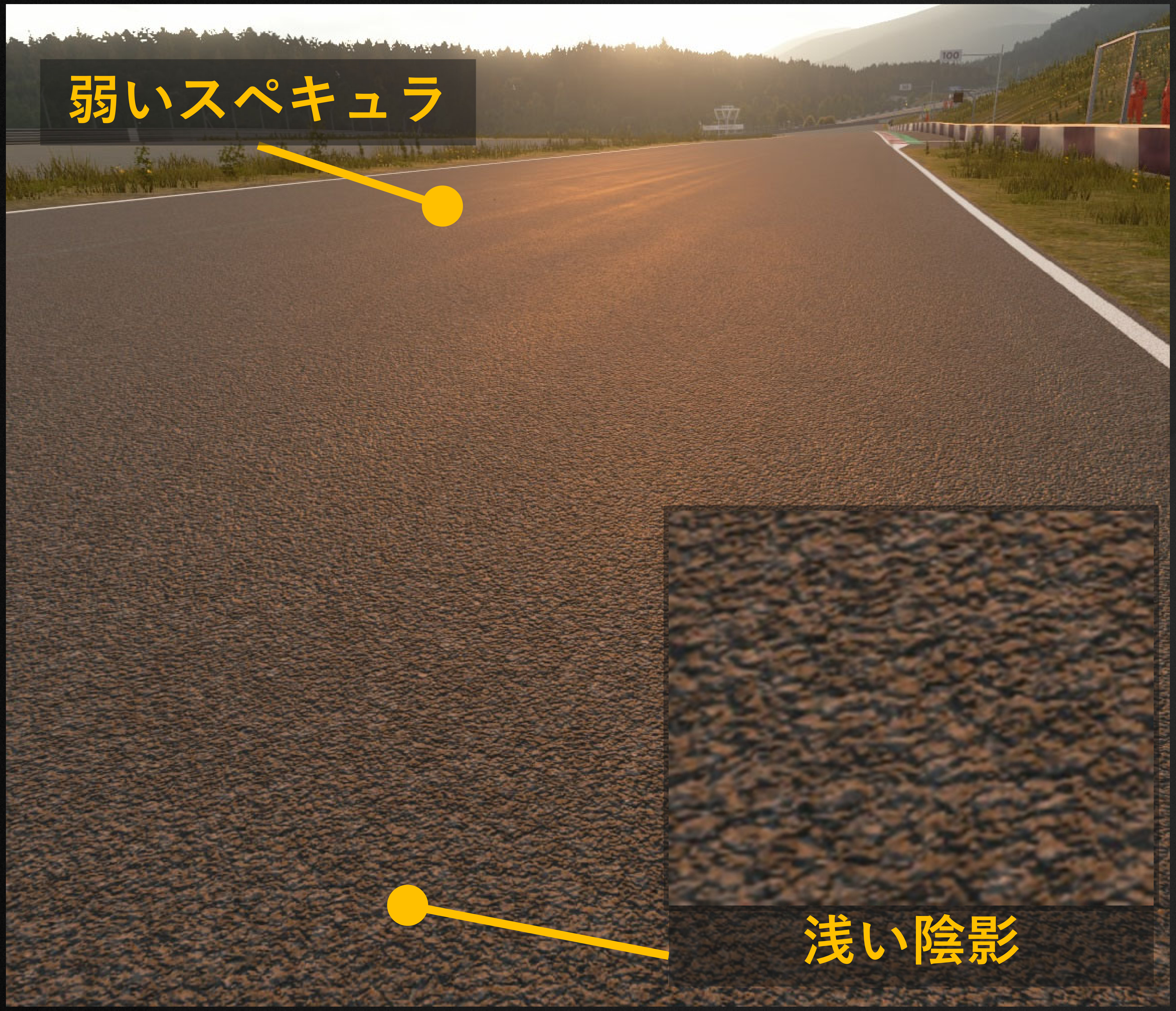
実写での見た目

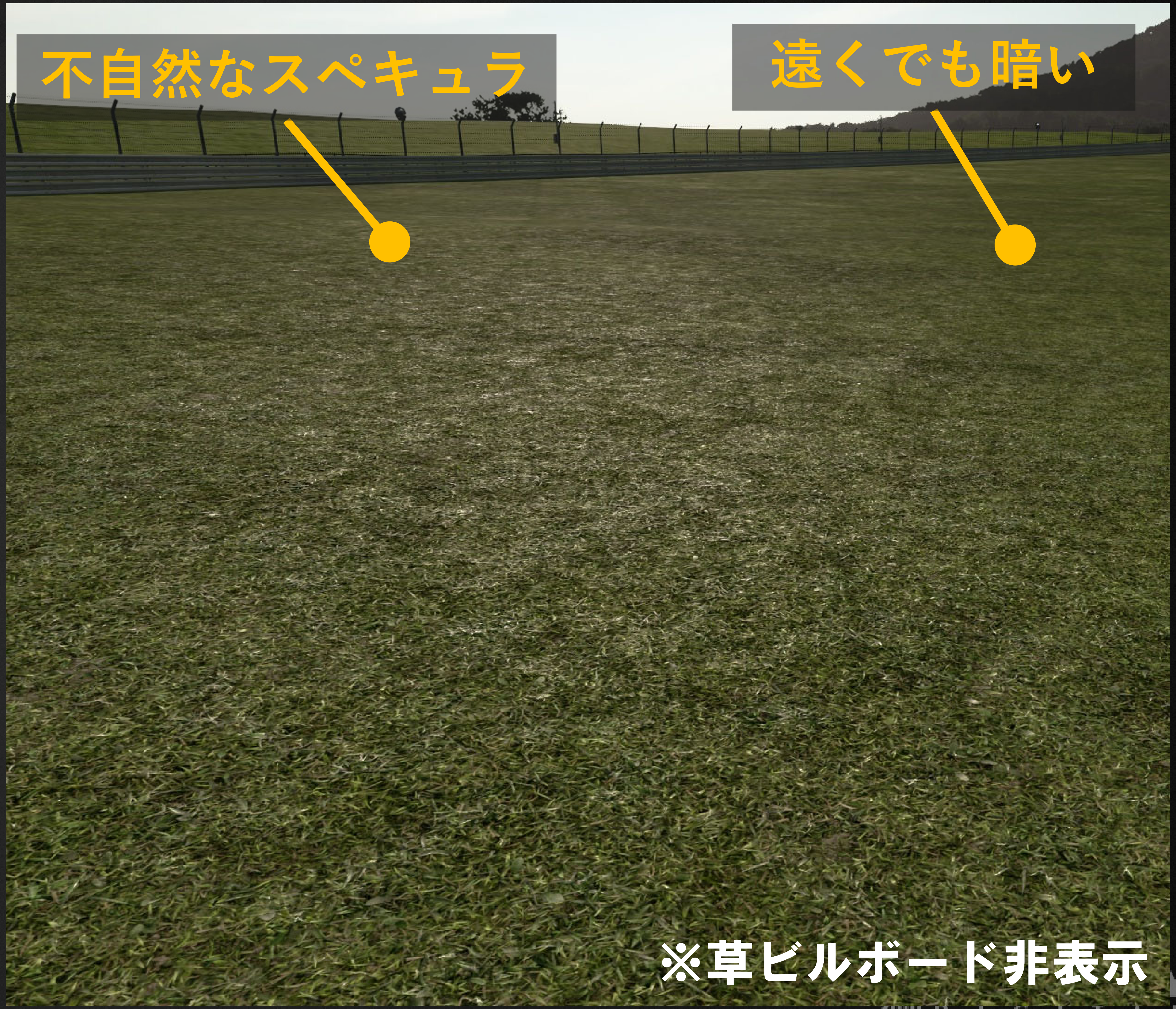
実写の路面・芝生には特徴的な見た目がある。



ゲーム内での見た目

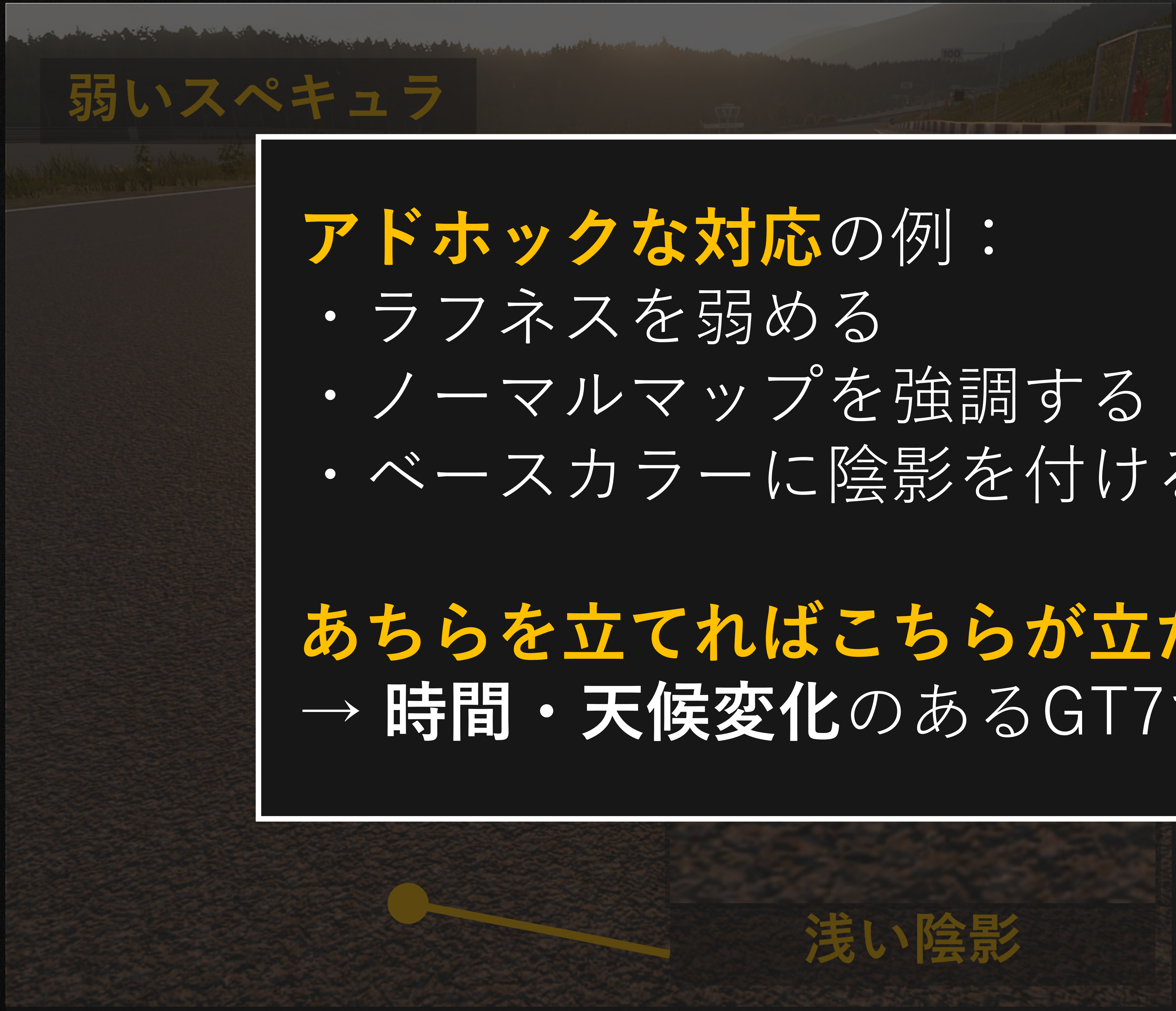
ゲーム内の路面・芝生だとこうなりがち。（GT Sportでの見た目）

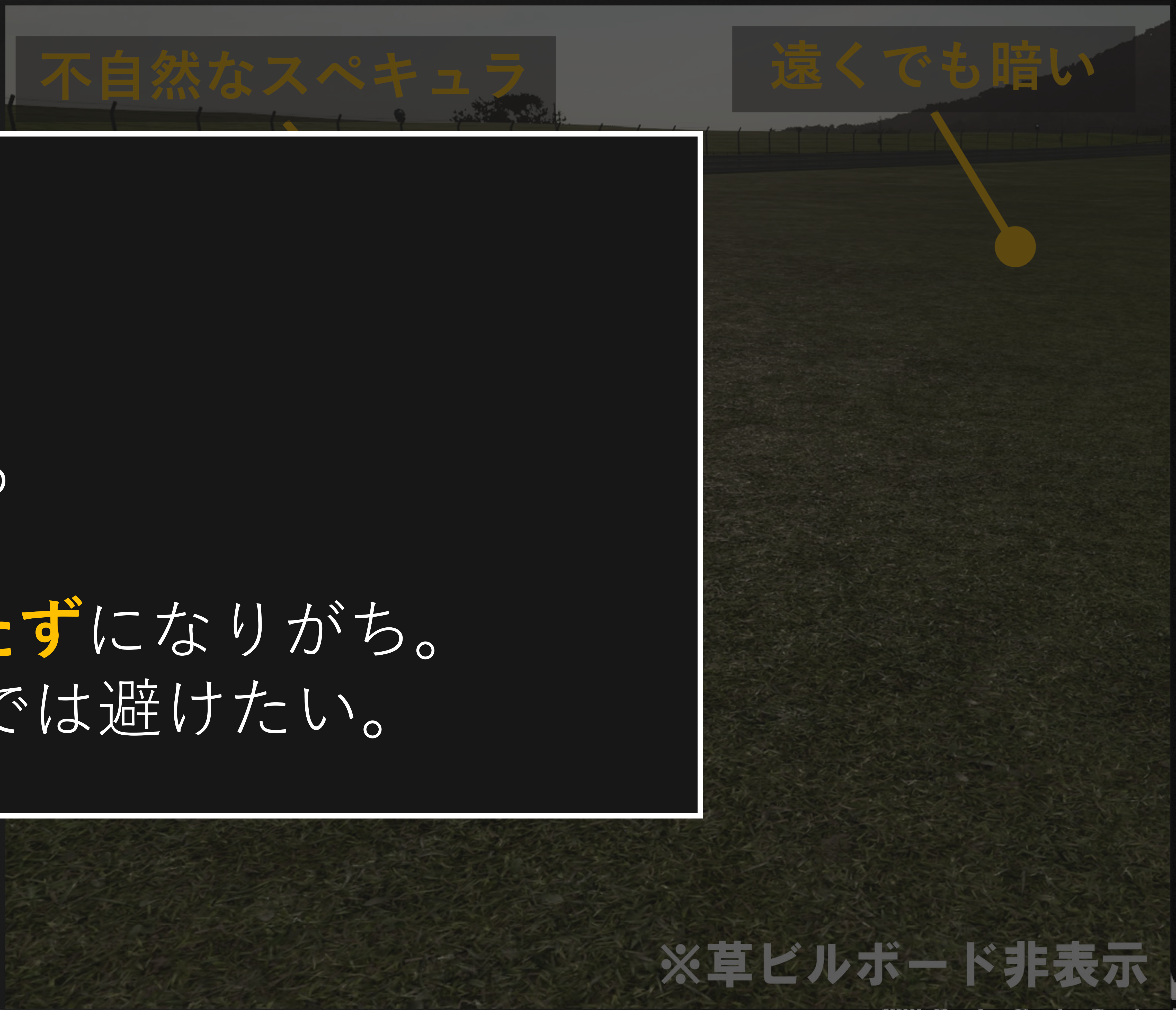




ゲーム内での見た目

ゲーム内の路面・芝生だとこうなりがち。（GT Sportでの見た目）





アドホックな対応の例：
・ラフネスを弱める
・ノーマルマップを強調する
・ベースカラーに陰影を付ける

あちらを立てればこちらが立たずになりがち。
→ **時間・天候変化**のあるGT7では避けたい。

どうして再現が難しいのか

主に、メソスケール構造をノーマルマップで表現していることに由来。

- **実際の路面・芝生**
  - 全てのスケールの凹凸が実際に存在
- **ゲーム中の路面・芝生**
  - メソスケールの凹凸を**ノーマルマップで表現**

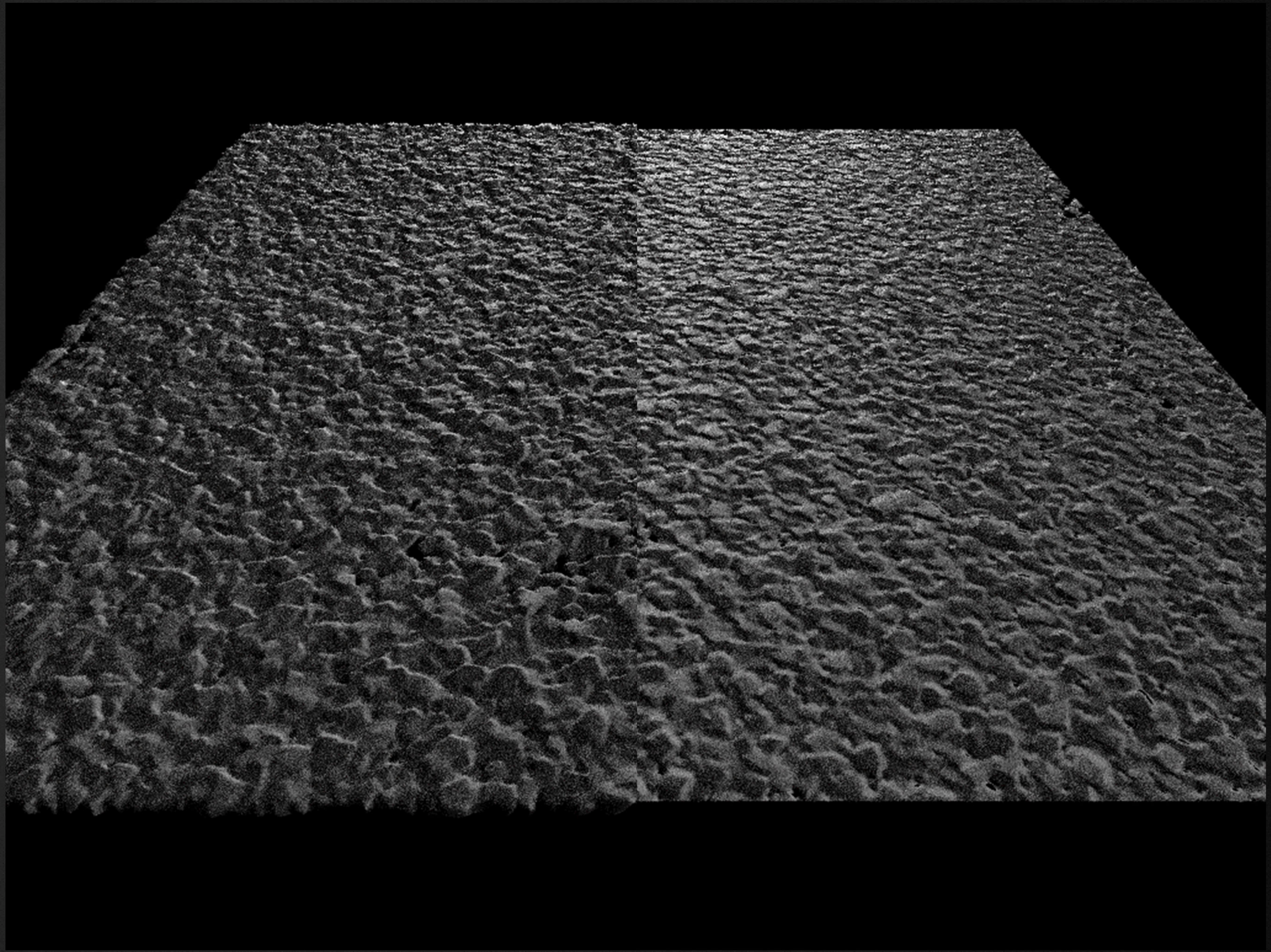
マクロスケールの構造
　3Dモデルが定義するジオメトリ。
マイクロスケールの構造
　マイクロファセットモデルが仮定する微小構造。
メソスケールの構造
　上記の中間のサイズ、ノーマルマップで表現される構造。

POLYPHONY™ DIGITAL

実際の凹凸とノーマルマップの違い

ノーマルマップは以下の現象が再現されない。

- 視差
  - 遮蔽により見え方が変わる
- ローカルシャドウ
  - メソスケール凹凸の影
- 多重散乱



マイクロファセットモデルにおけるShadowing-Masking効果[Heitz 2014]としてよく議論される。

POLYPHONY™ DIGITAL

Parallax Occlusion Mapping (POM) による表現

POMによる表現は必要な要件を満たさなかった。

- **POMによる凹凸表現**
  - 負荷の高い処理である。
  - 芝生のような高周波でオーバーハングの多い形状は難しい。
  - 遠方ではMipMapによって消えてしまう。
    - 広域的な見た目が表現出来ない。

→　PS5のみで一部の地面に使用するなどに留まる。

路面・芝生シェーダーの開発

- **必要な要件と対する方針**
  - メソスケール構造による特徴的な見た目を再現できること。
    - **視差、ローカルシャドウ**の再現。
  - 近景と遠景両方で正しく表示できる。
    - MipMapにも対応する。
  - 時間変化・天候変化に対しロバストであること。
    - 物理ベースのアプローチを行う。
  - PS4上でも動作可能なほどランタイムの動作がシンプルであること。

POLYPHONY™ DIGITAL

今回採用した手法

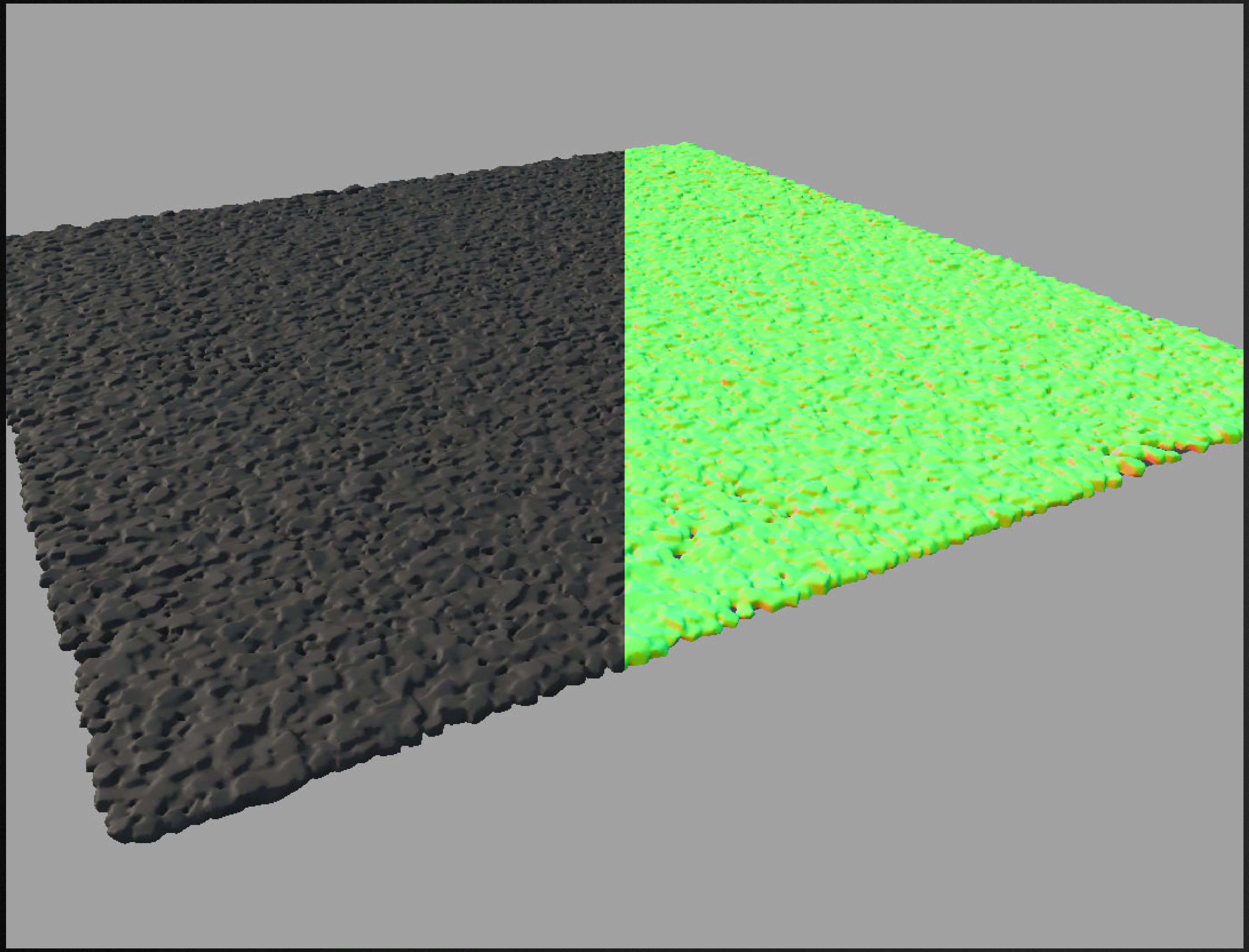
[Wu et al. 2019] から着想。

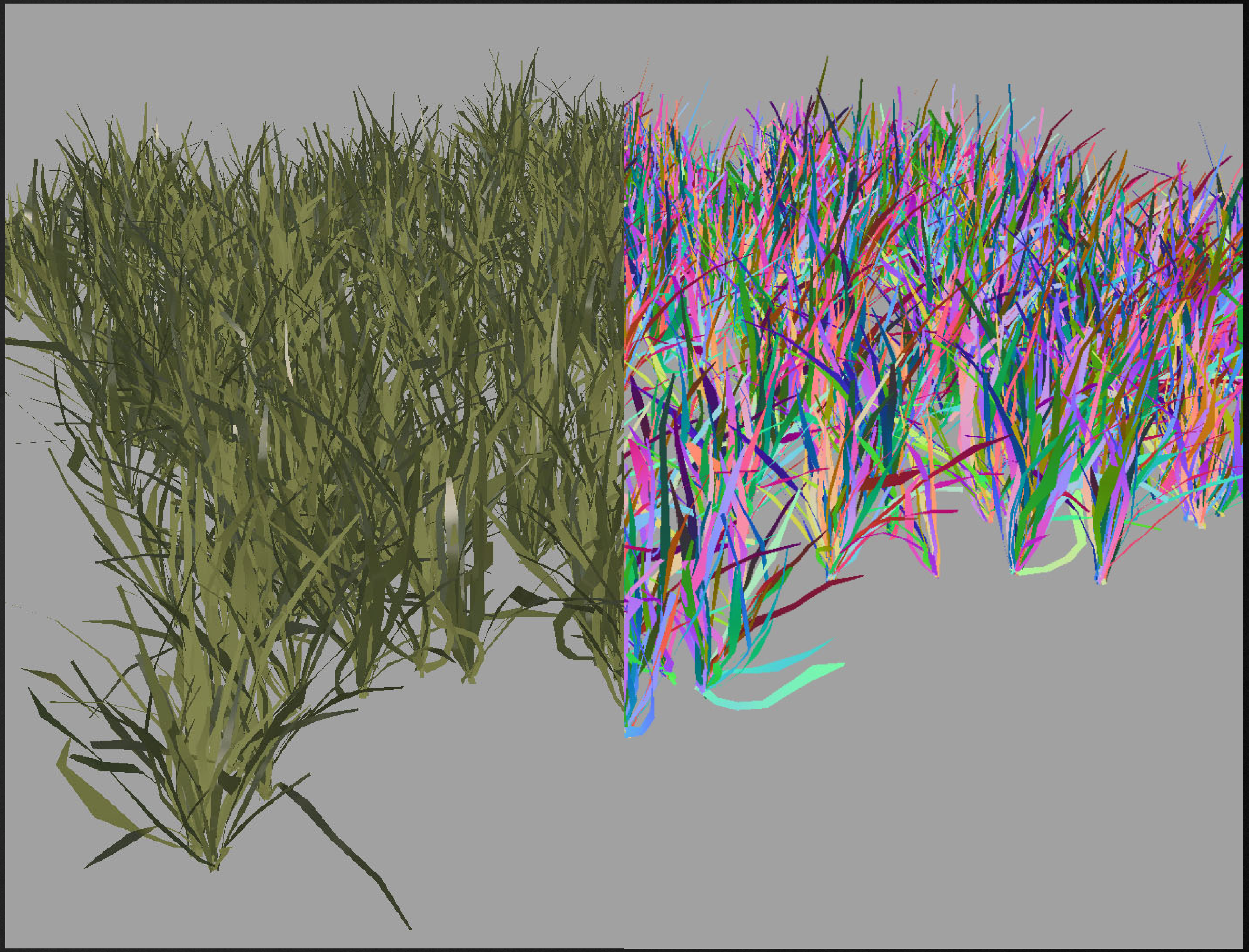
1. 視差とローカルシャドウの**定性的な性質について考察。**
2. 視差とローカルシャドウを、
   視線方向や光源方向に依存した関数としてモデル化。
3. **3Dモデルを用いて視差とローカルシャドウを計測**し、
   関数をフィッティング。
4. 描画時にノーマルマップでのシェーディングに対して
   視差とローカルシャドウの関数を適用する。

POLYPHONY™ DIGITAL

３Ｄモデルを用意

実際にメソスケール構造を持ったリファレンスモデルを作成。



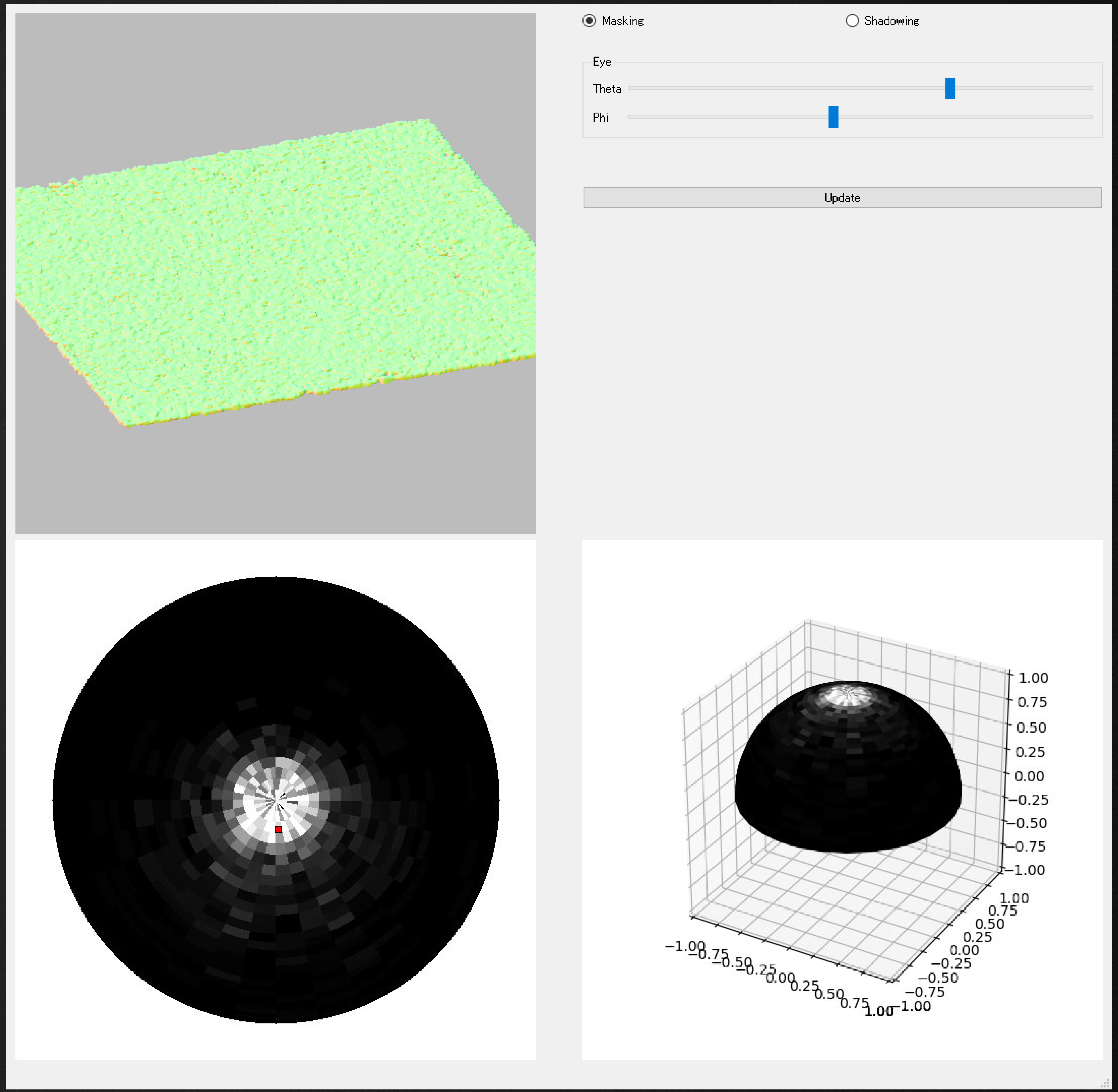


POLYPHONY™ DIGITAL

測定ツールを用意

視線方向や光源方向を変えつつ、
視差による変化やローカルシャドウ分布を計測するツールを作成した。

- 具体的に何を何のために測ってるかは後述
- 社内のレイトレ用フレームワークを活用 [Ozawa 2018]



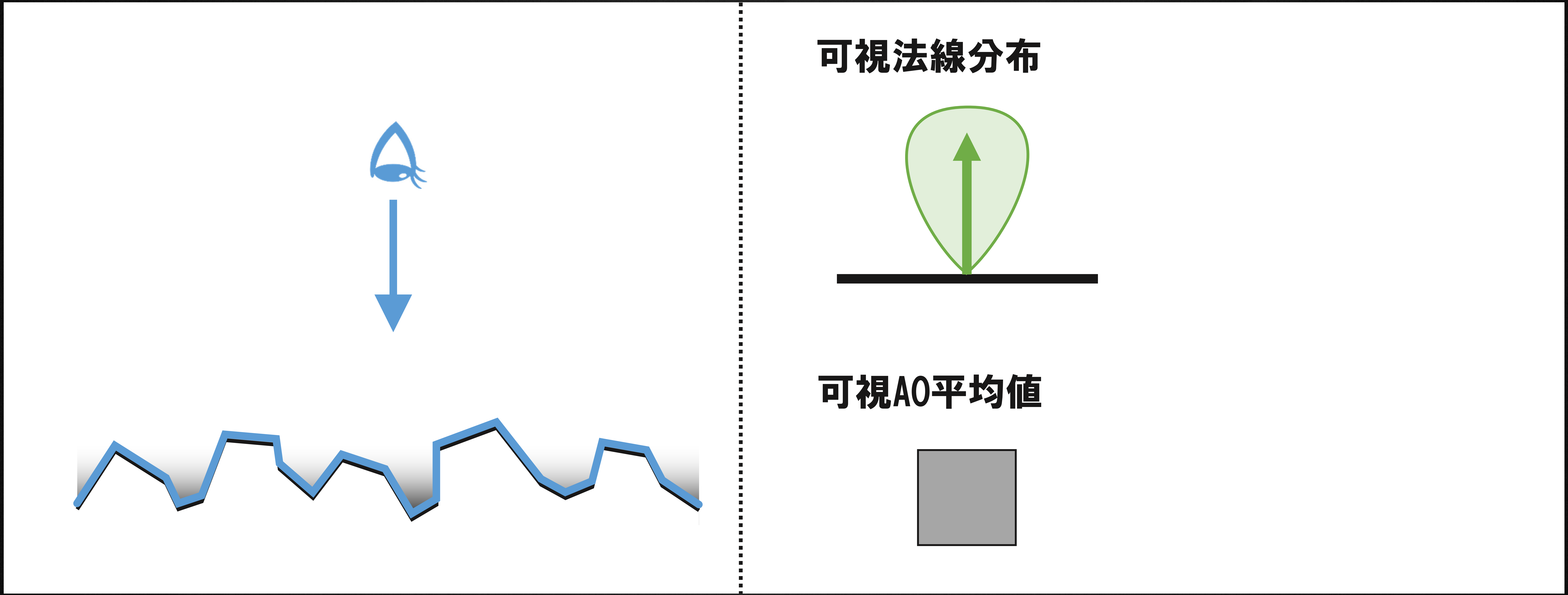
POLYPHONY™ DIGITAL

視差

POLYPHONY™
DIGITAL

視差：定性的な説明

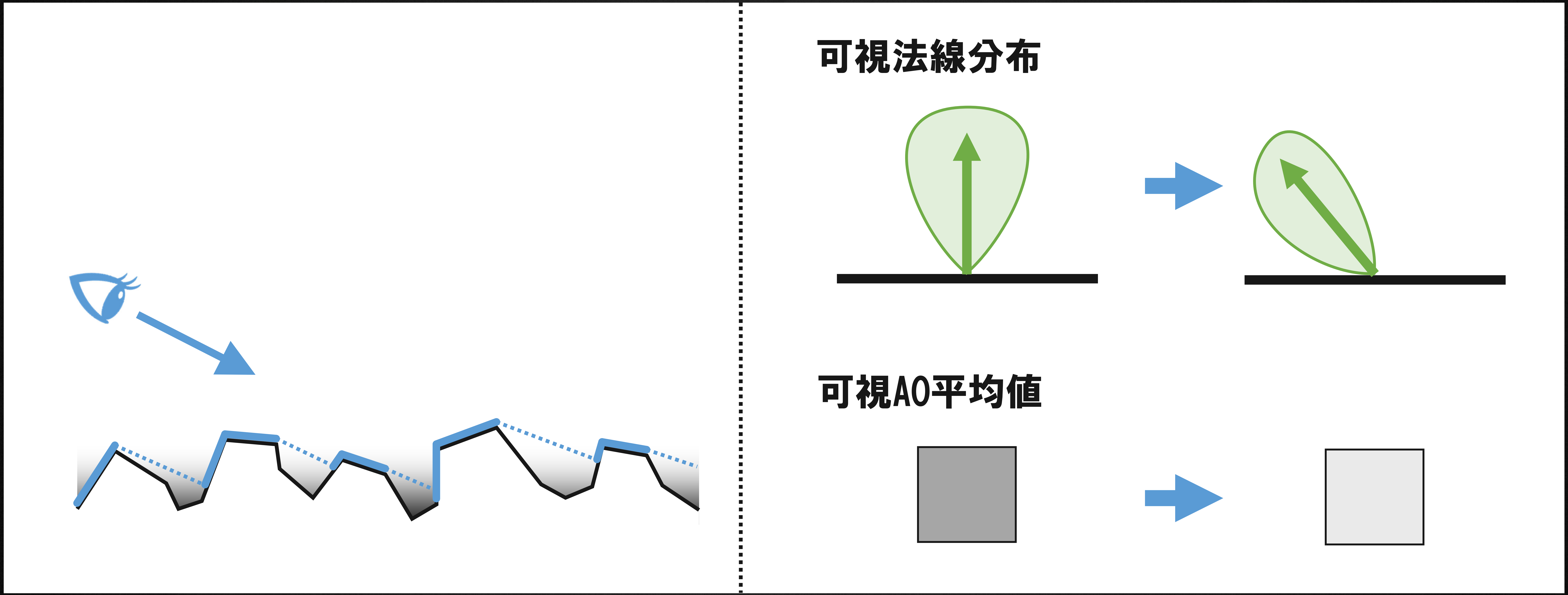
視線方向が傾くと見かけ上のパラメーターが変わる。



POLYPHONY™ DIGITAL

視差：定性的な説明

視線方向が傾くと見かけ上のパラメーターが変わる。



視差：モデル化

- 視線方向が傾いた際、下記のように変化させることにした。
  - ノーマルを視線方向に傾ける
  - ラフネスを低下させる
    - View-dependent roughness [Kojima et al. 2013] [Lagarde 2017]
  - AOを高くする

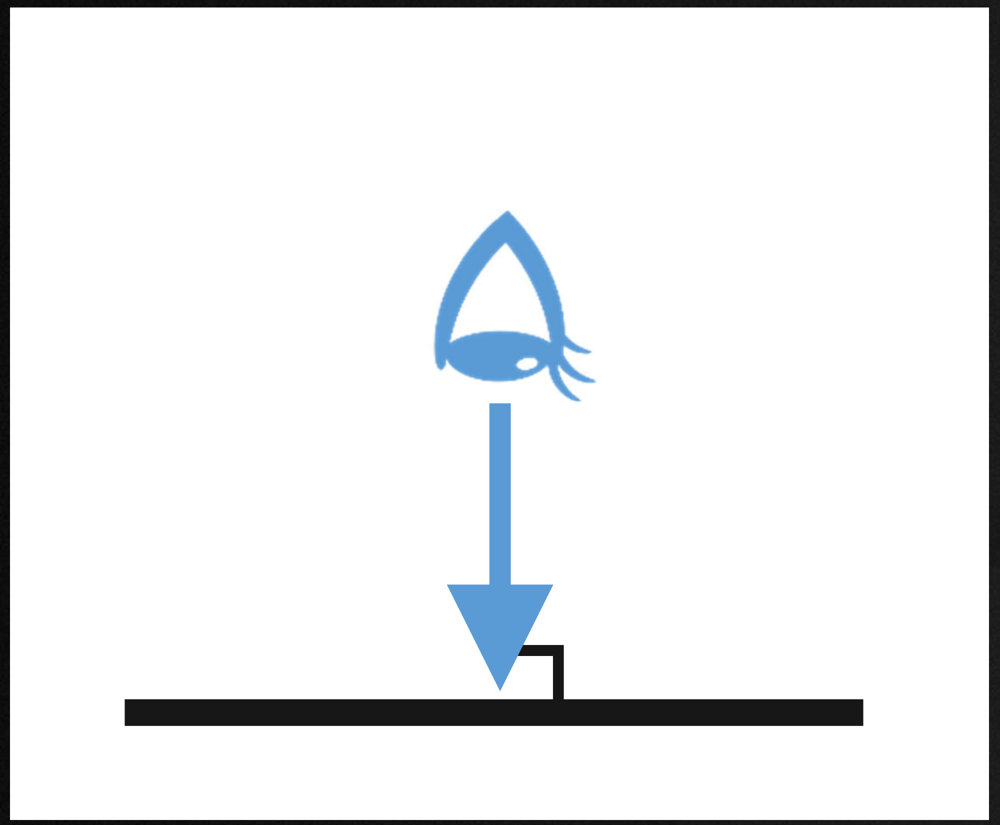
- レイトレでの**リファレンスと比較**し、
  どのパラメーターを変化させるべきか検証した。
  - ※場合によっては他のパラメーターを変化させる必要もある。
    あくまで上記は測定した形状についての結果。

POLYPHONY™ DIGITAL

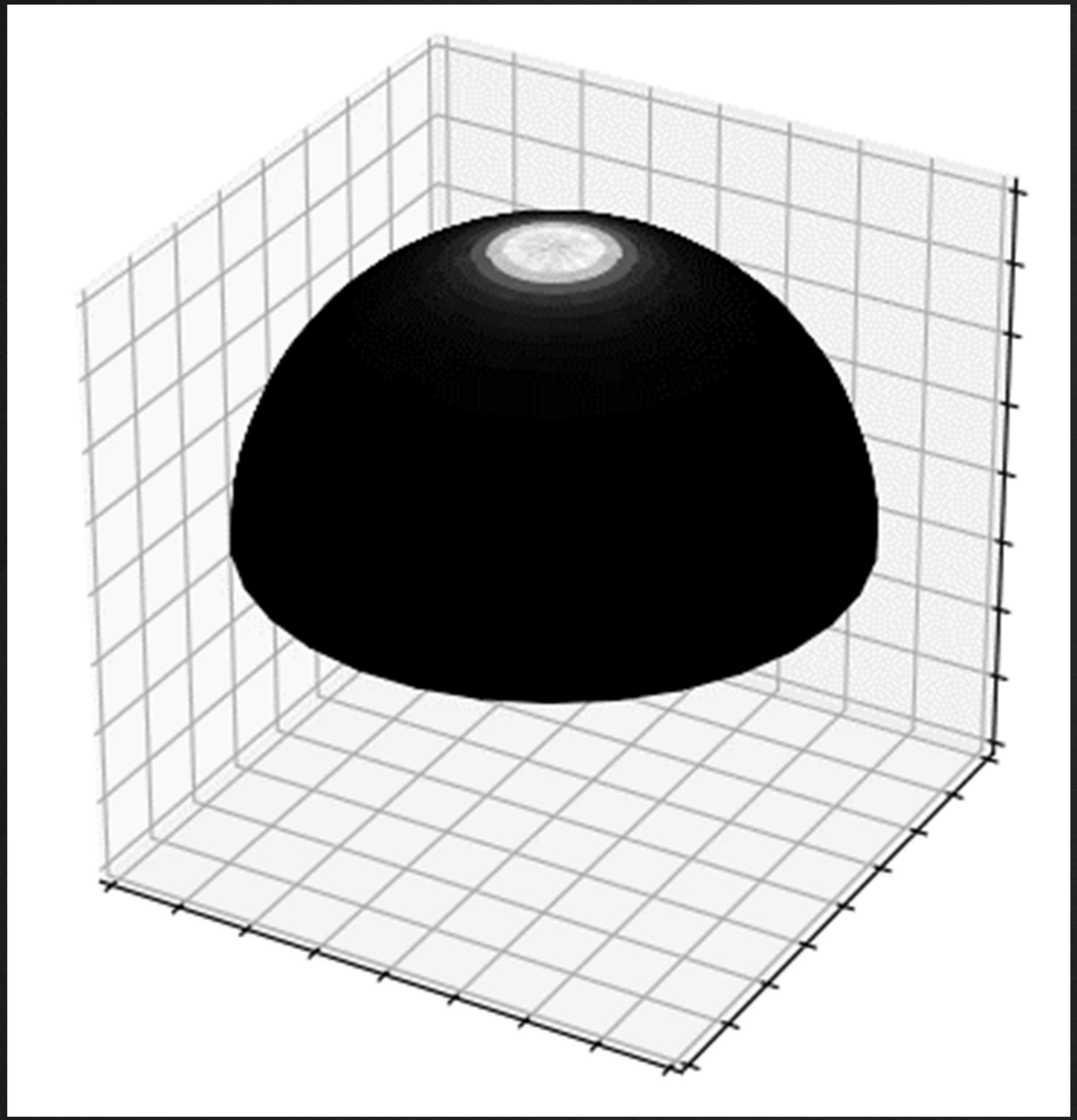
視差：変化の計測

例：可視法線分布の変化

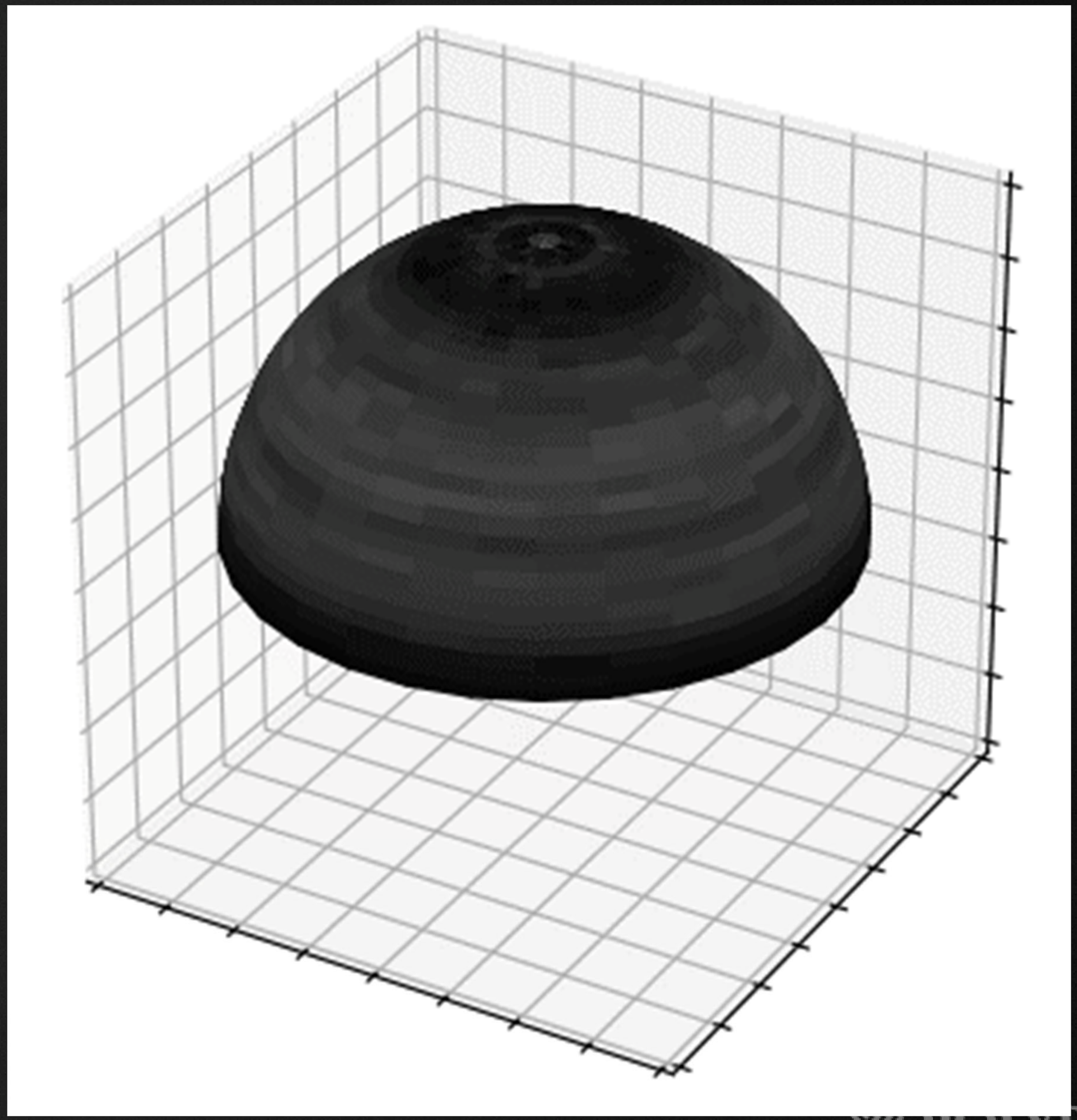
0°



路面



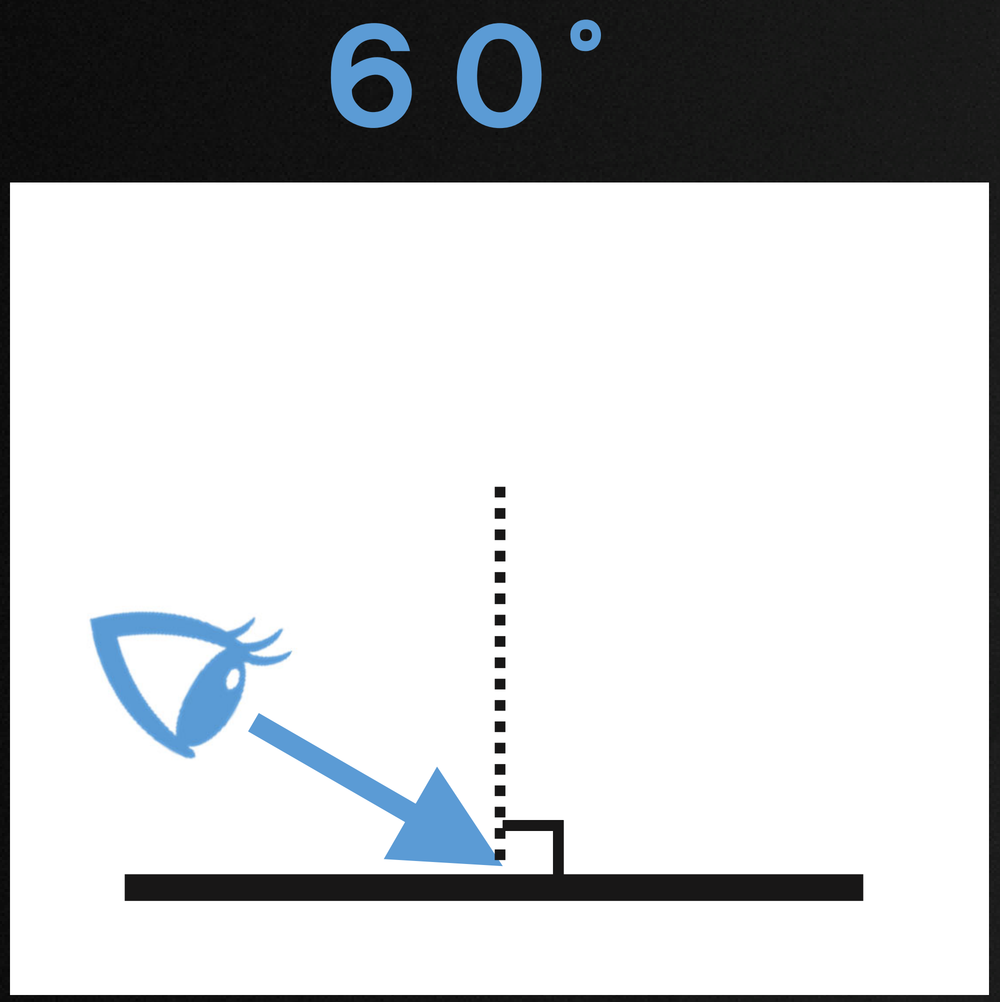
芝生



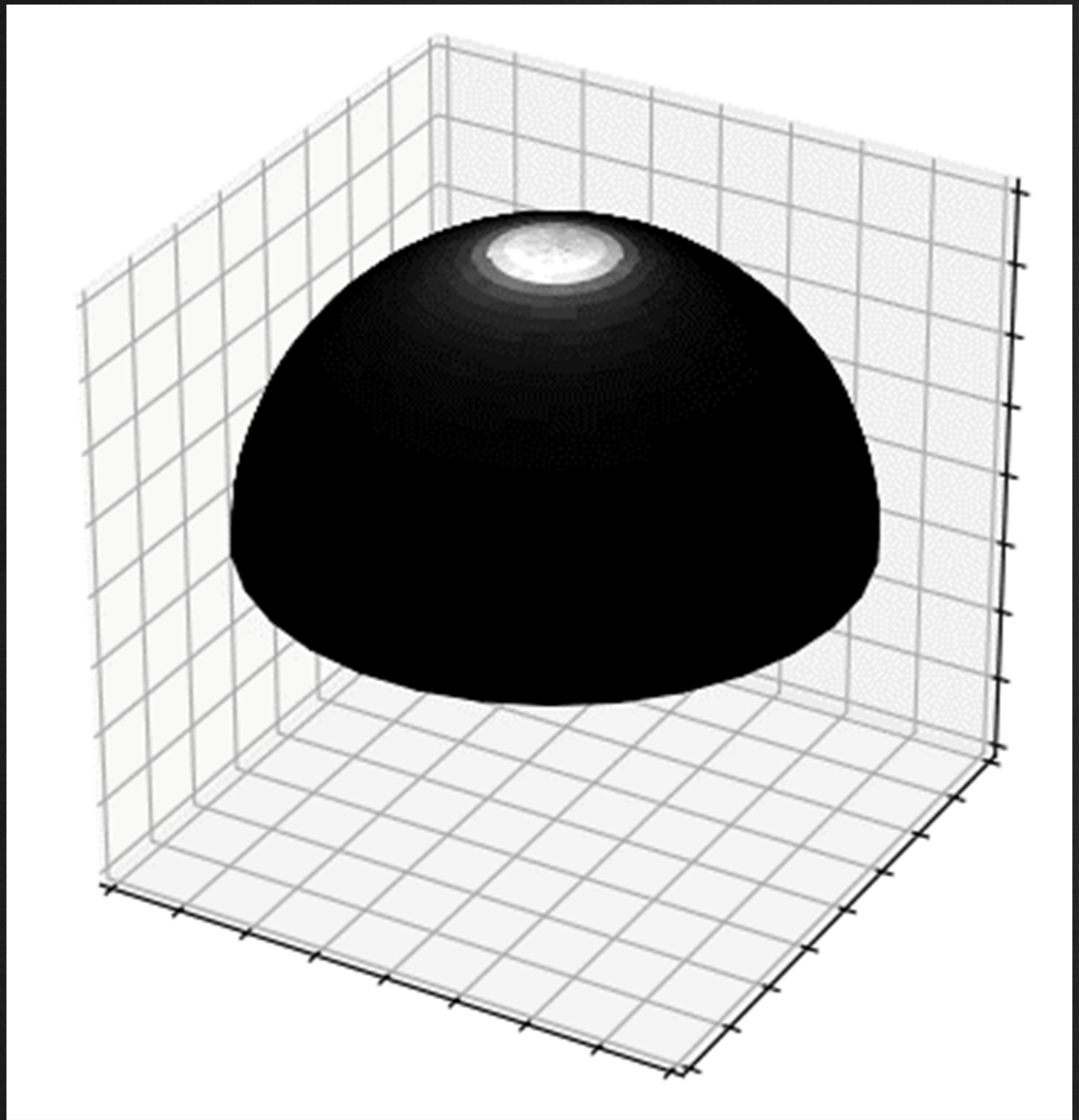
POLYPHONY™ DIGITAL

視差：変化の計測

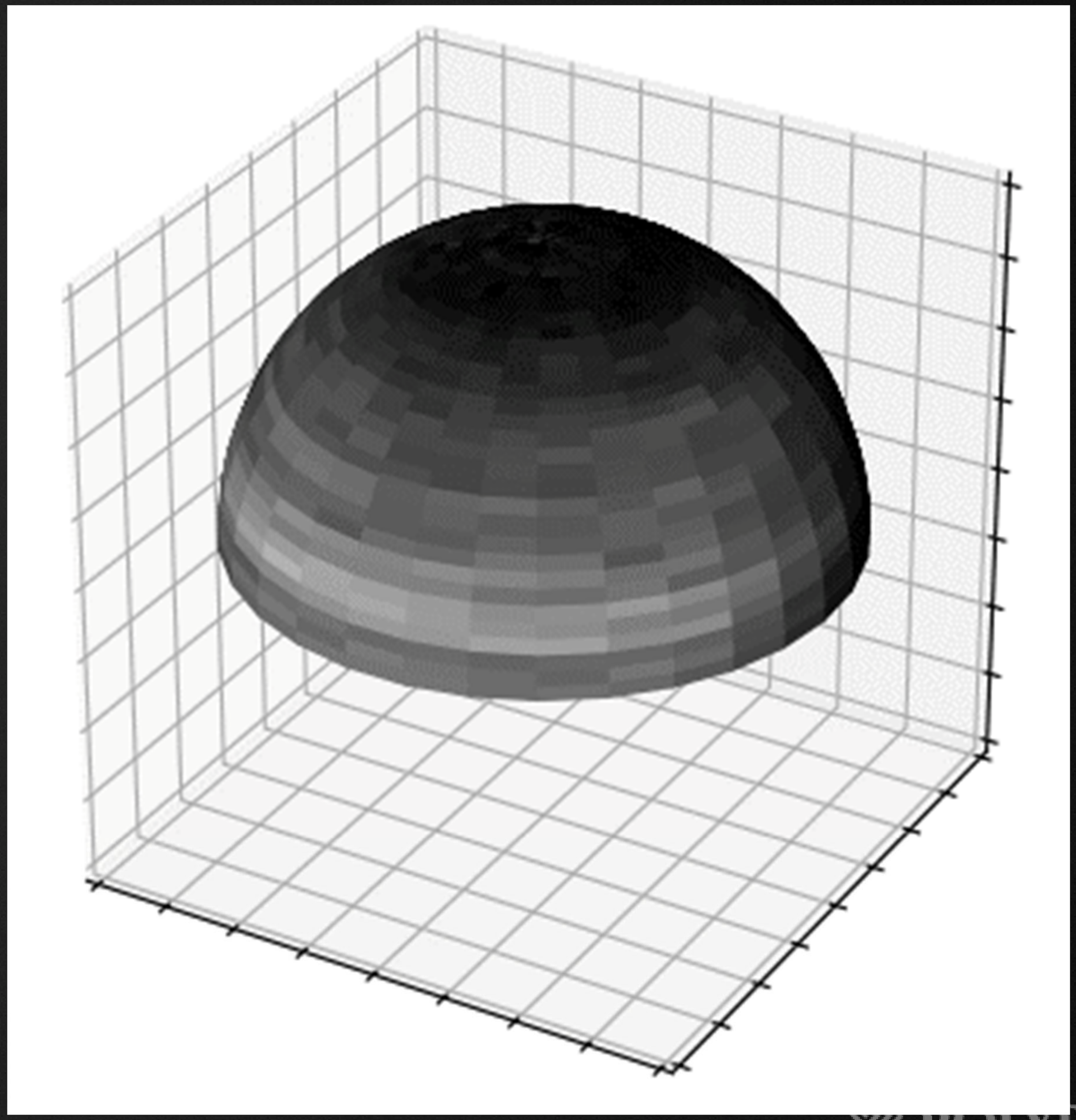
例：可視法線分布の変化



路面



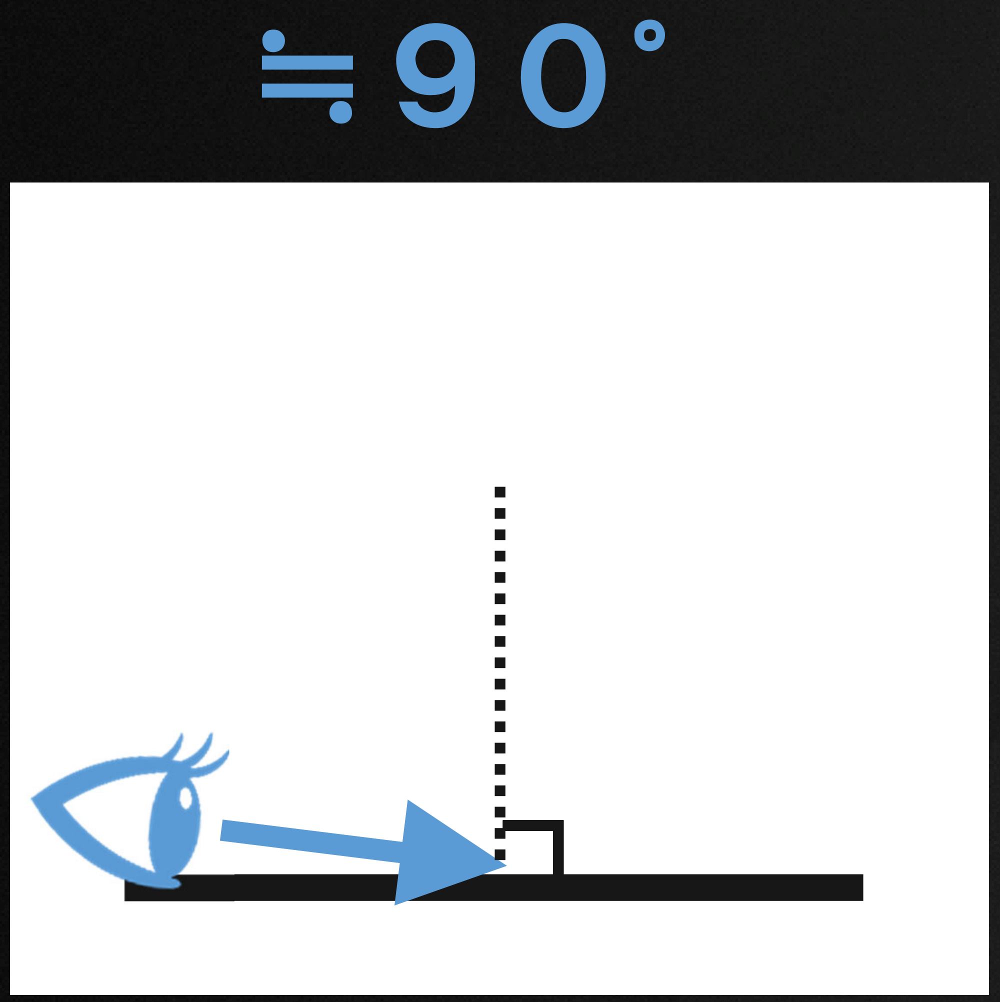
芝生



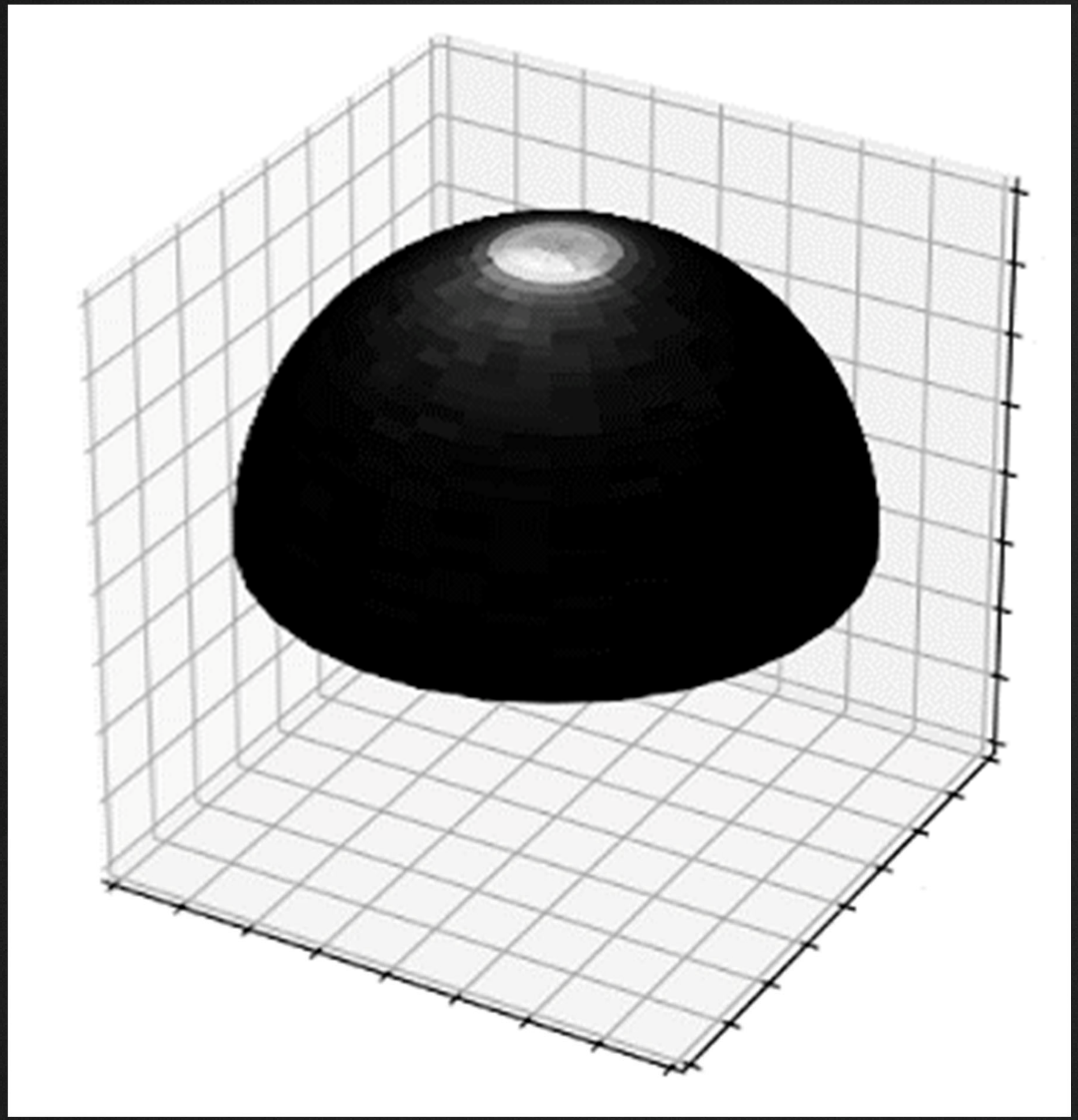
POLYPHONY™ DIGITAL

視差：変化の計測

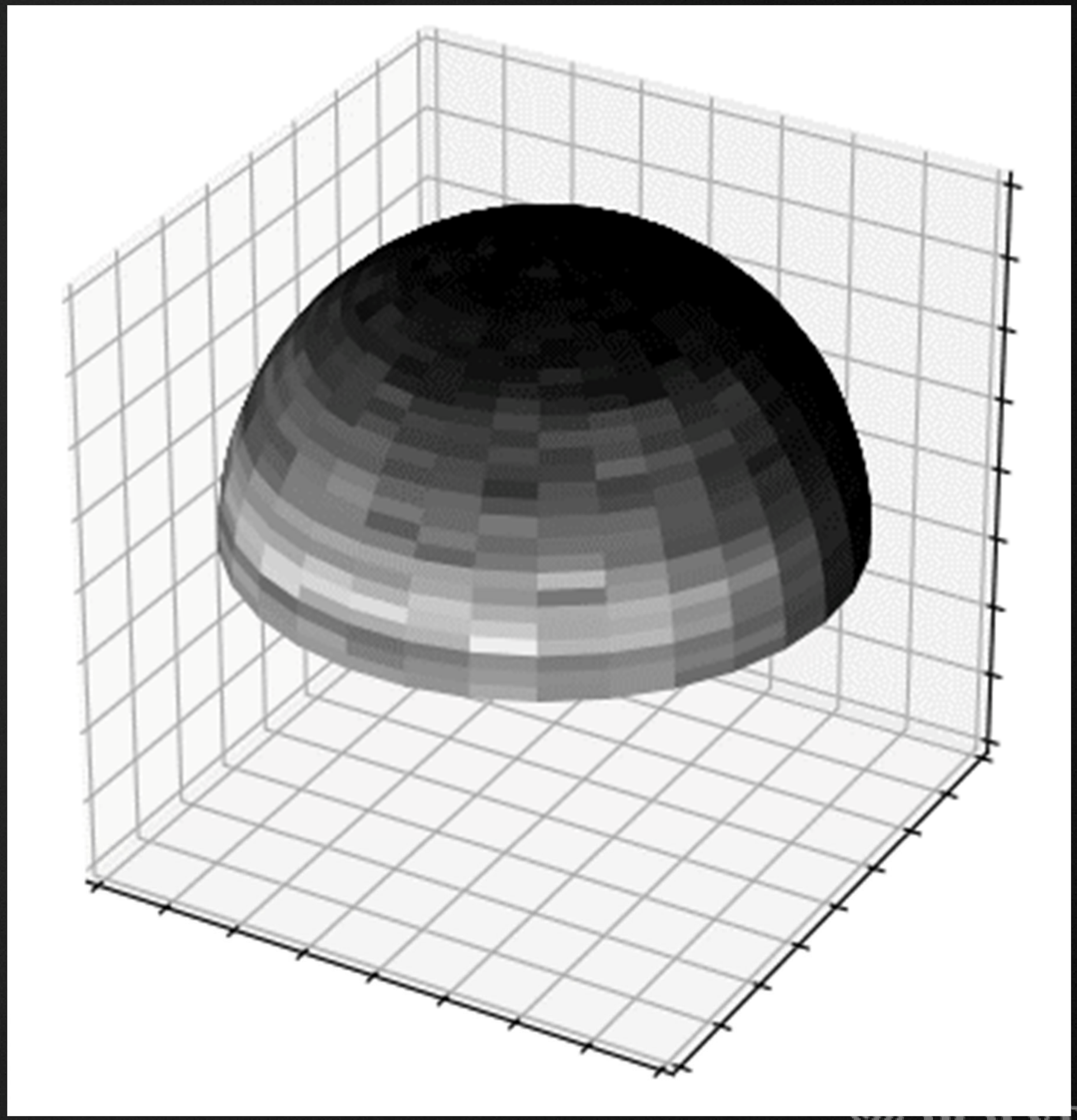
例：可視法線分布の変化



路面



芝生



POLYPHONY™ DIGITAL

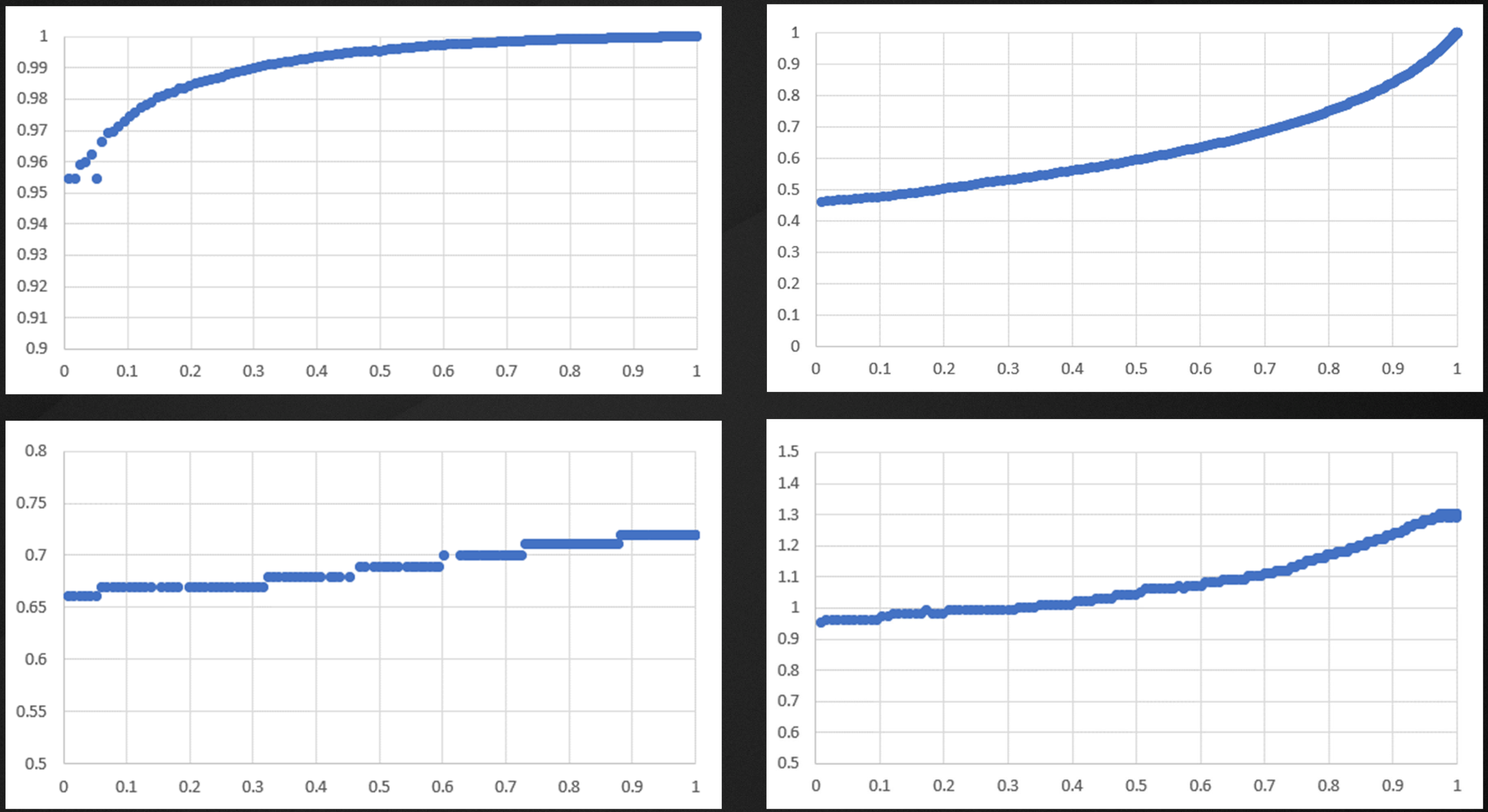
視差：計測結果

計測した変化を再現するような式をシェーダー上に実装した。

路面　　芝生

可視法線平均方向
$dot(N_{shading}, N_{geometry})$

ラフネス



視線方向
$dot(V, N_{geometry})$

視線方向
$dot(V, N_{geometry})$

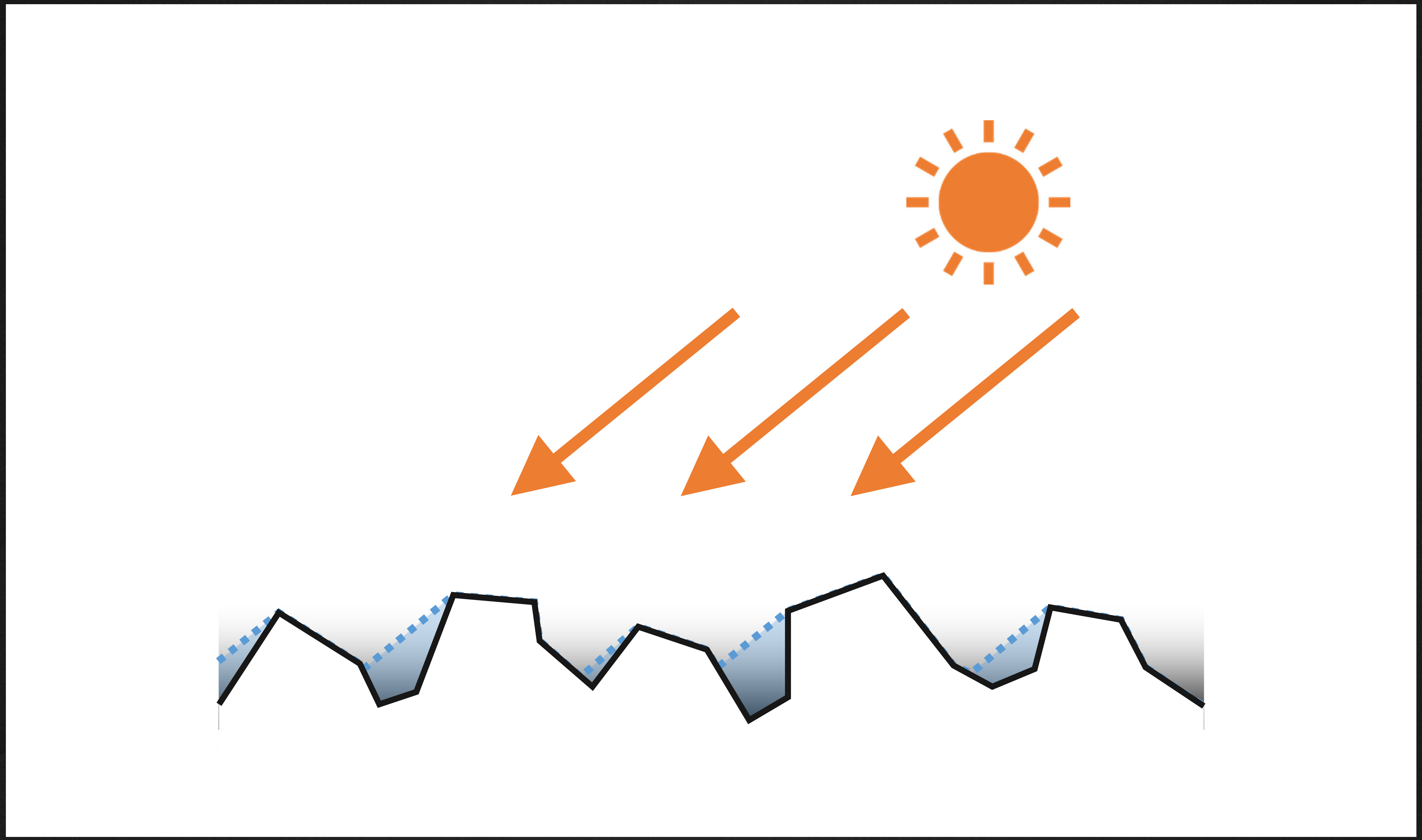
POLYPHONY™ DIGITAL

ローカルシャドウ

POLYPHONY™ DIGITAL

ローカルシャドウ：定性的な説明

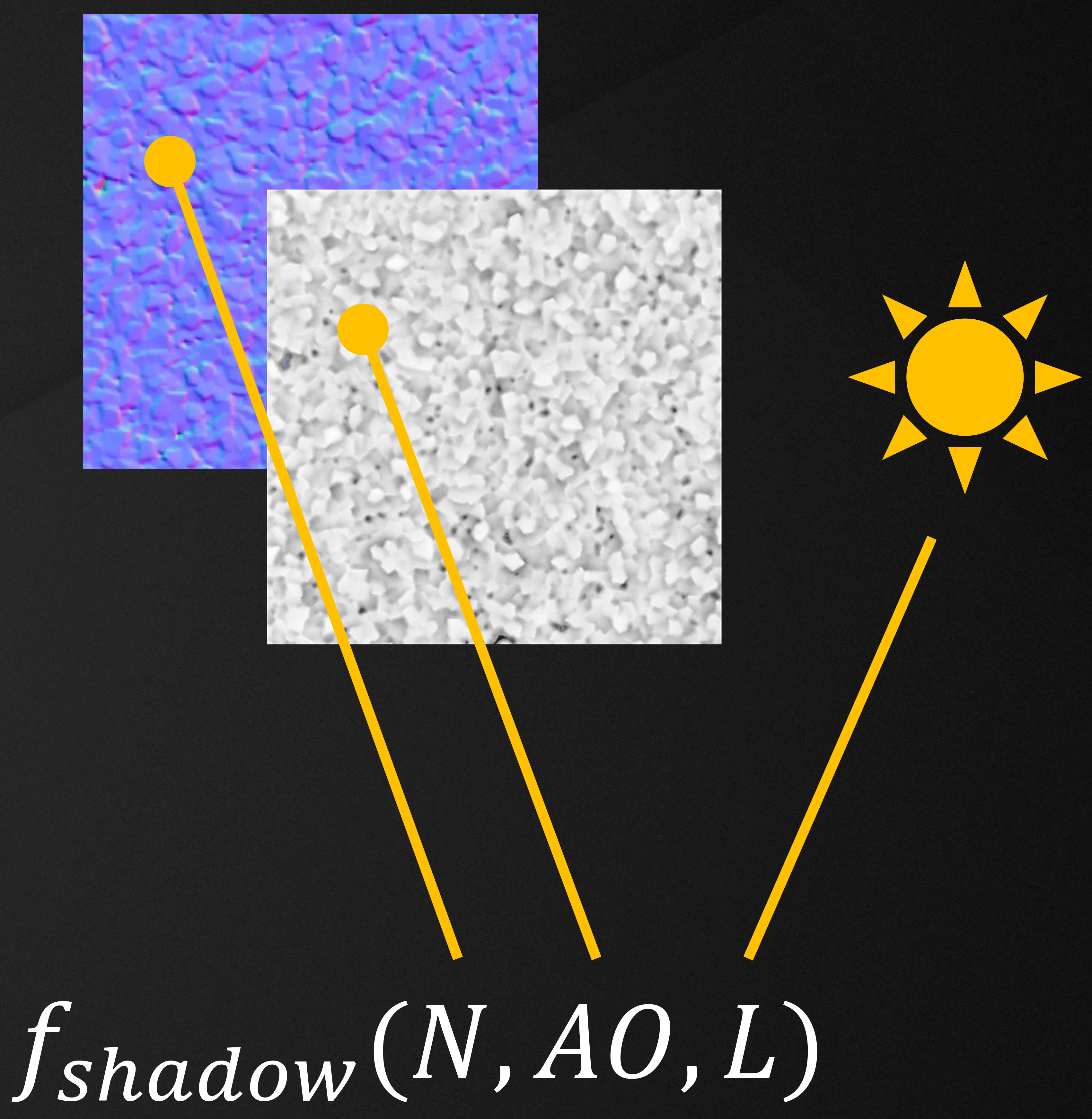
奥まっているところほど影になりやすい。



POLYPHONY™ DIGITAL

ローカルシャドウ：モデル化

- **メソスケール構造のAOを表すテクスチャ**を持たせる。
- 法線方向, AO, 光源方向 から**影の中かを近似的に判定する。** [Brinck et al. 2016]

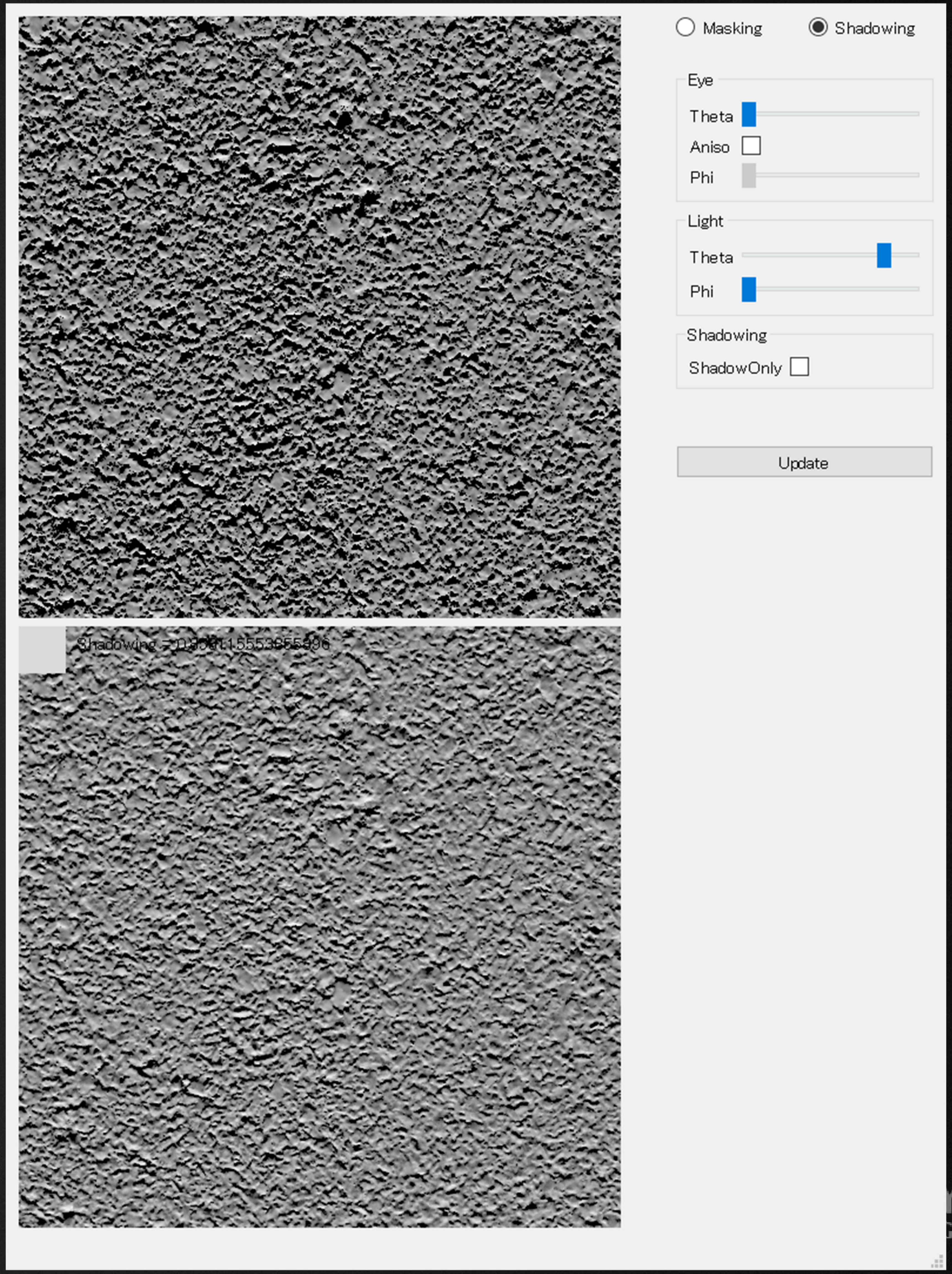


POLYPHONY™ DIGITAL

ローカルシャドウ：計測

例：路面のローカルシャドウ

- **レイトレーシングによる影と良く一致する影の式を探す。**
  - ツール上で、
    レイトレーシングによる影と
    近似式で出した影を比較。
  - 様々な式を試した。



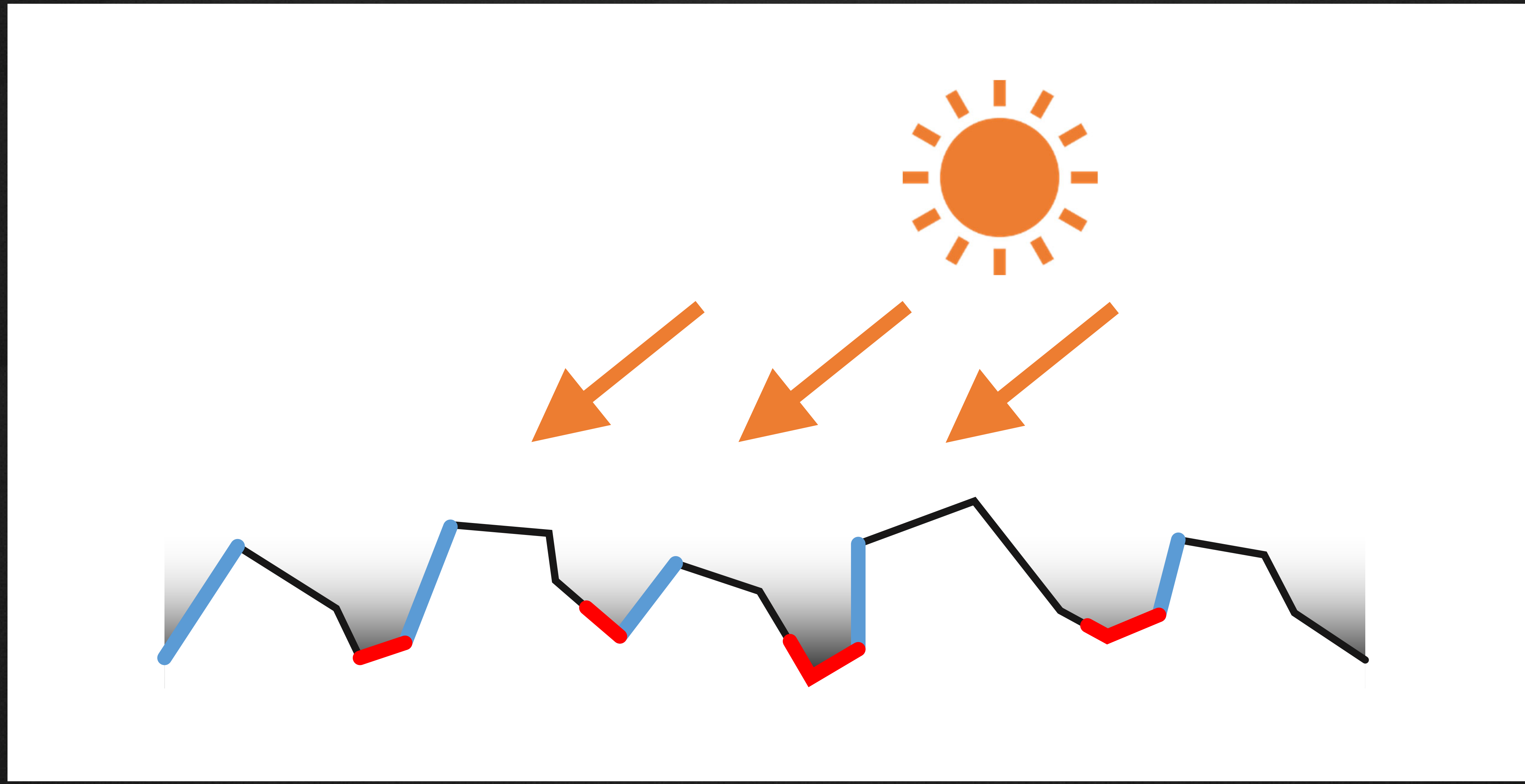
ローカルシャドウ：最終的な式

例：路面のローカルシャドウ

$$f_{shadow}(N, AO, L) = clamp01(dot(N, L) - \alpha(1 - AO) + 0.5)$$

α：定数（影の強さ）

- **コサイン項による暗部を AO 値が低い所へ伸ばす。**
- MipMapのために出来るだけ線形になるように考慮。



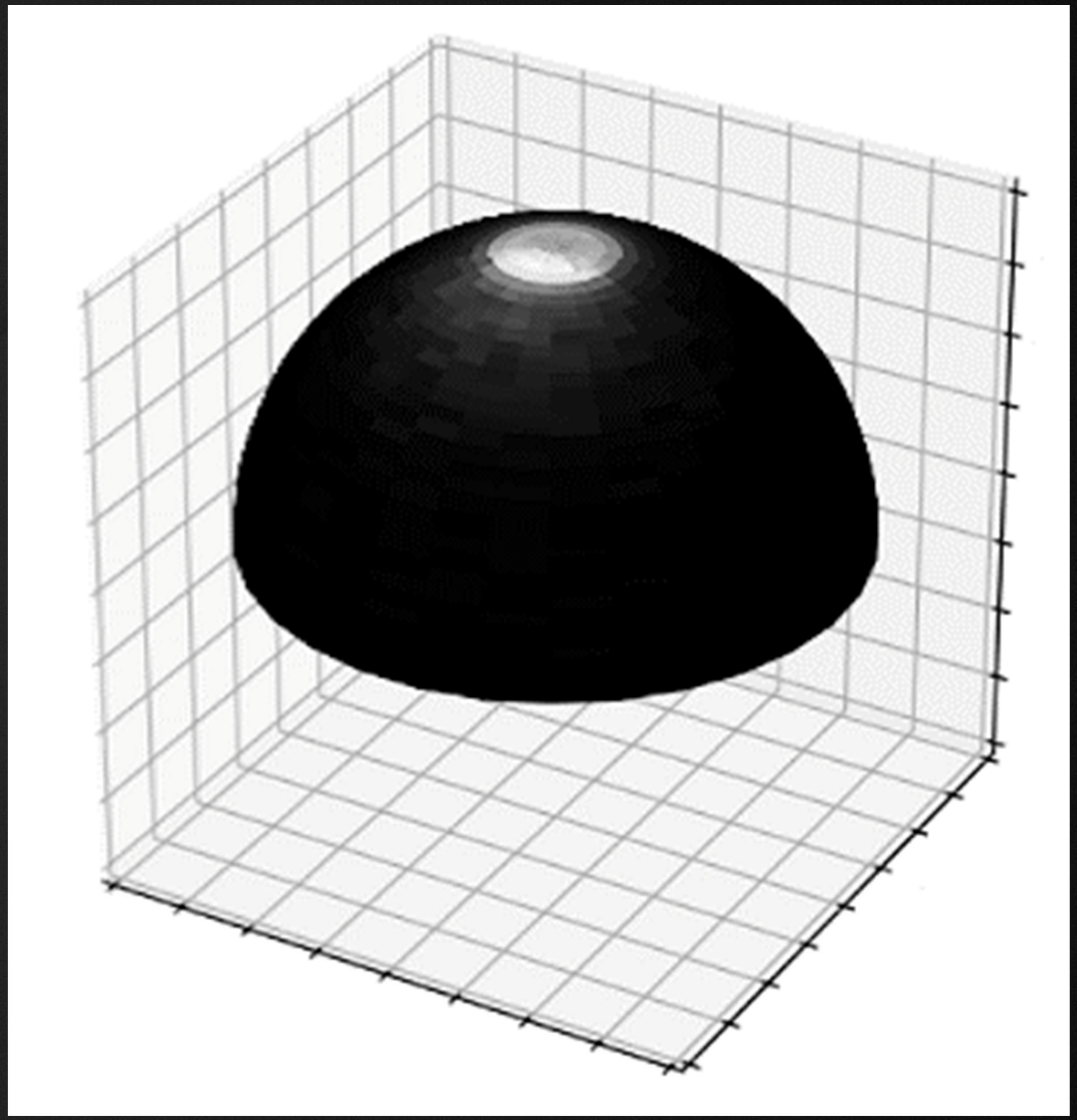
POLYPHONY™ DIGITAL

その他のテクニック

その他のテクニック１

路面の法線分布について

- 路面を斜めから見たときの**法線分布は偏っている**。
    - 平均方向は傾くが、
      ピーク方向は真上のまま。
    - GGXとは異なる分布である。
- 単純に法線方向を曲げると実際の凹凸での見た目と一致しない。
    - スペキュラの位置が変わる。

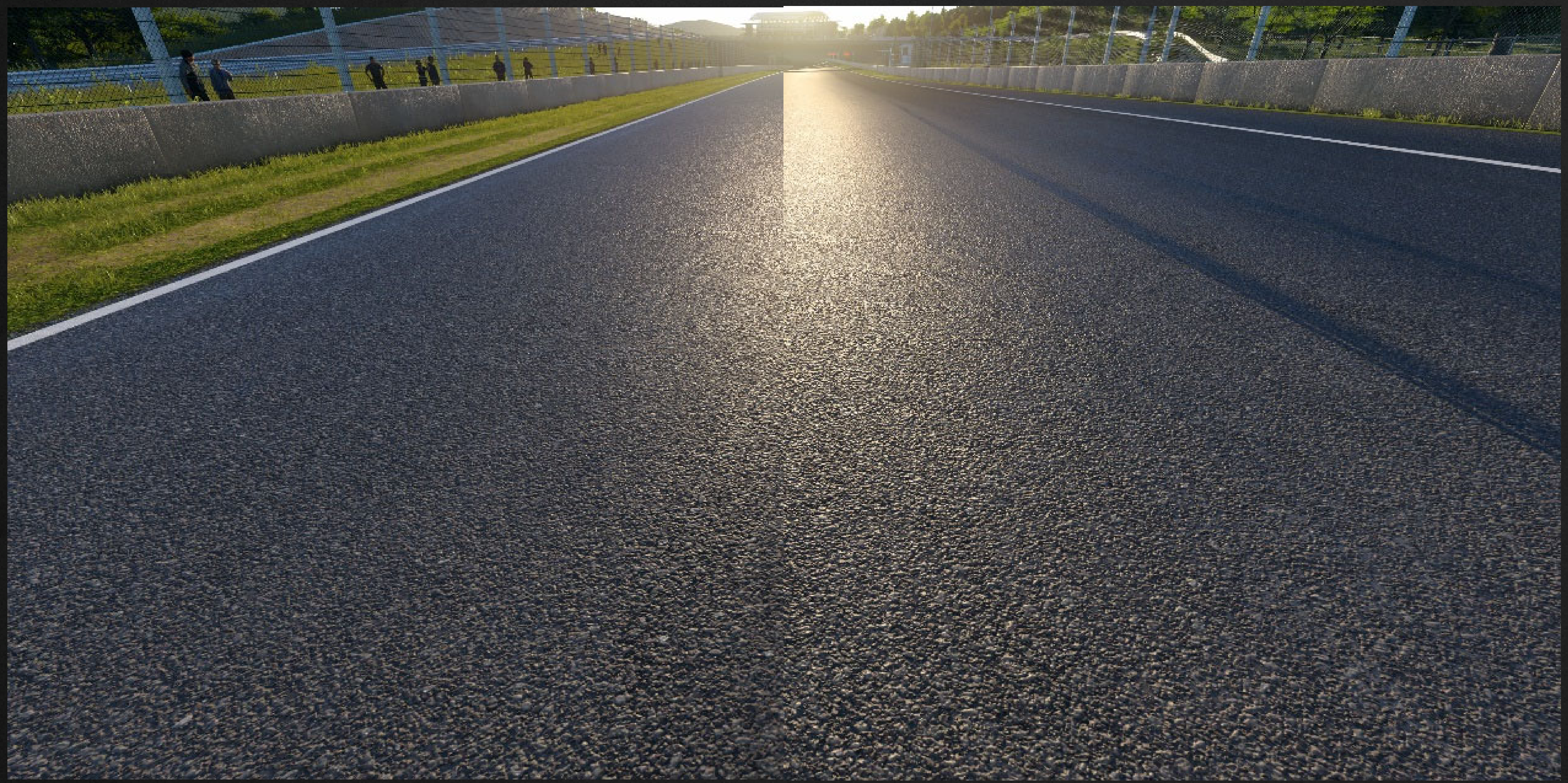


その他のテクニック１

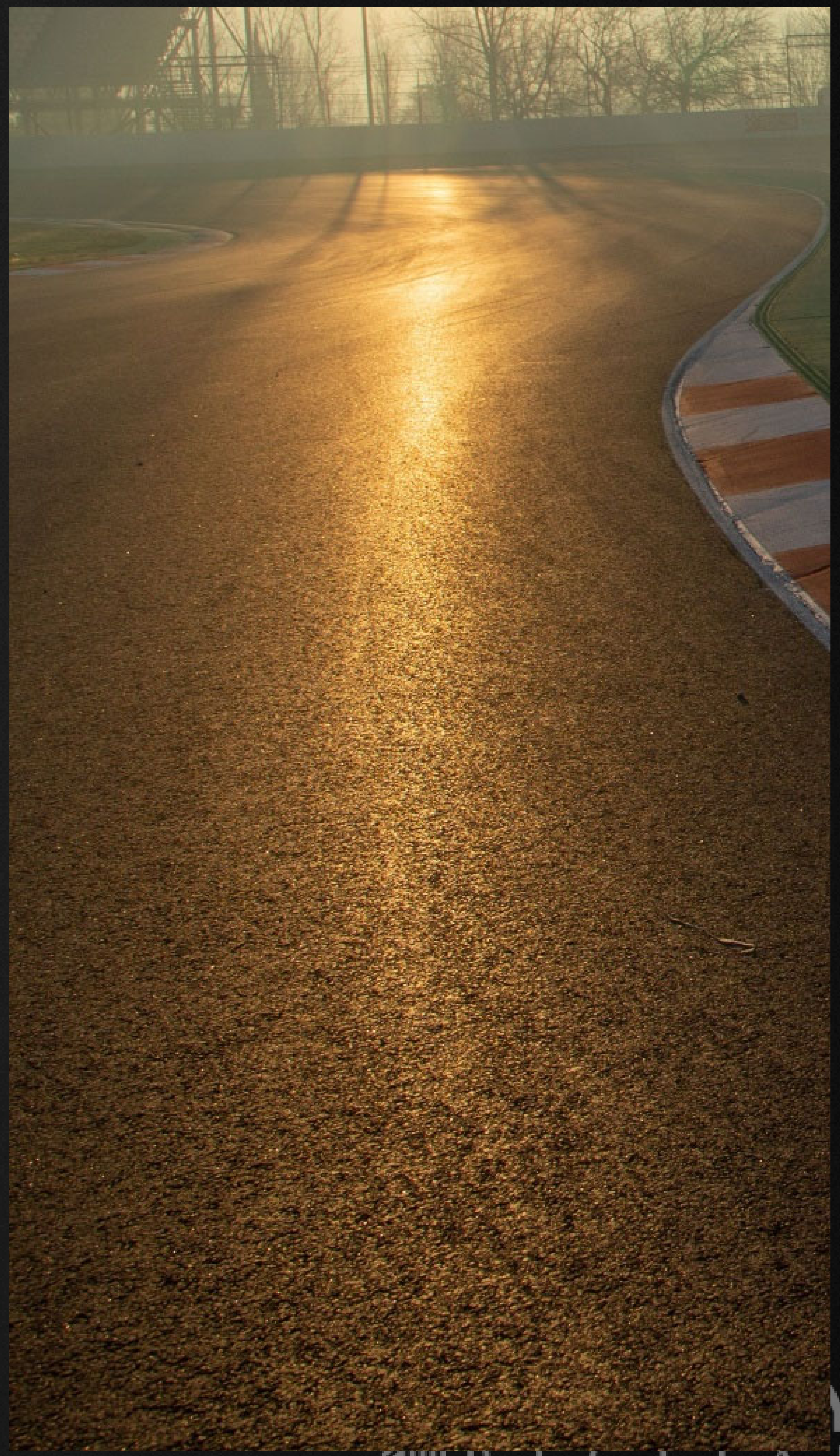
路面の法線分布について

- 対応：ディフューズは法線を曲げて計算するが
  スペキュラについては法線を曲げない。
  - そのかわり、視線方向に傾いたNDF成分の分だけ
    スペキュラを減衰させるようにした。

修正前 **修正後**



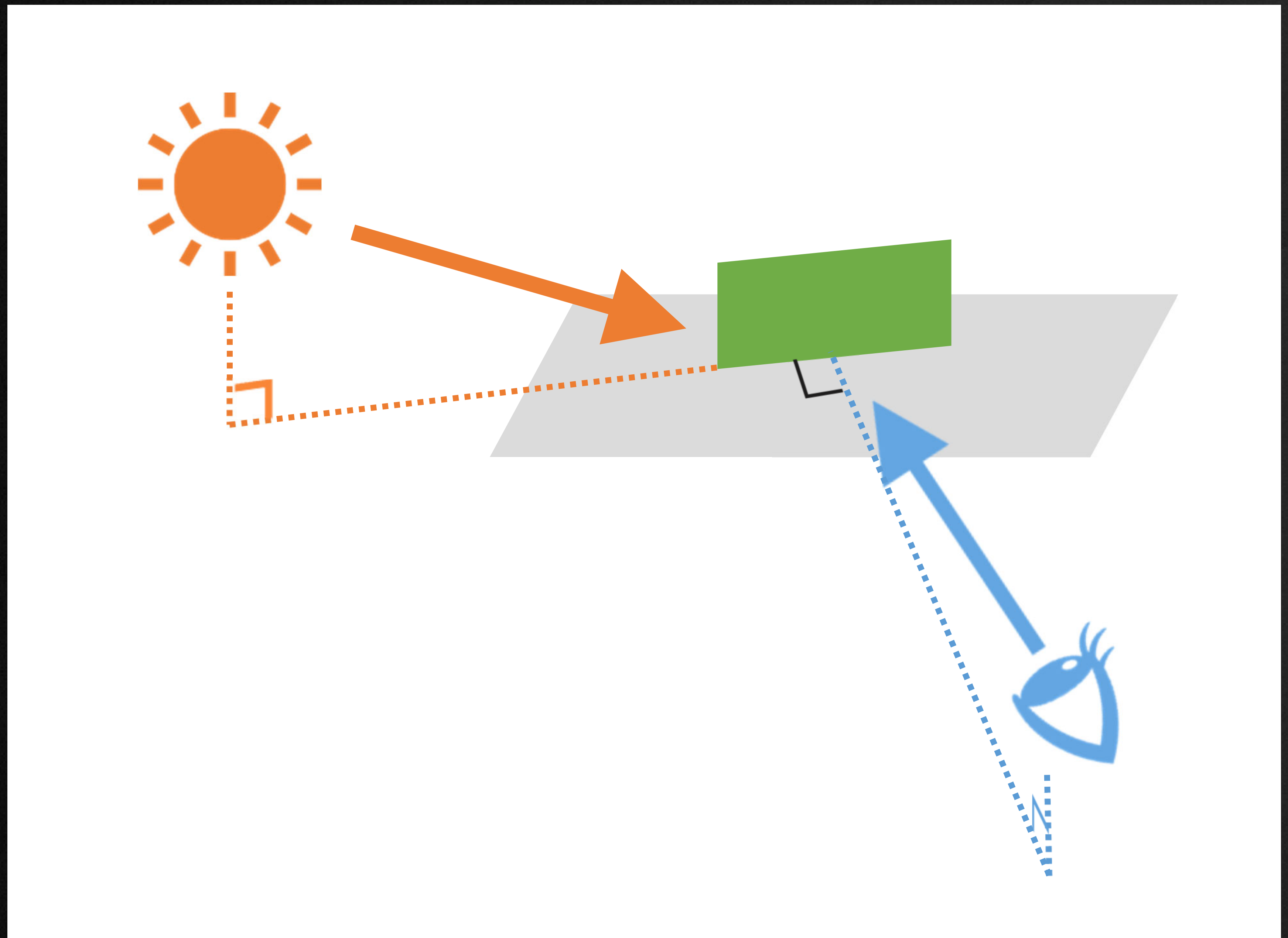
実写の路面

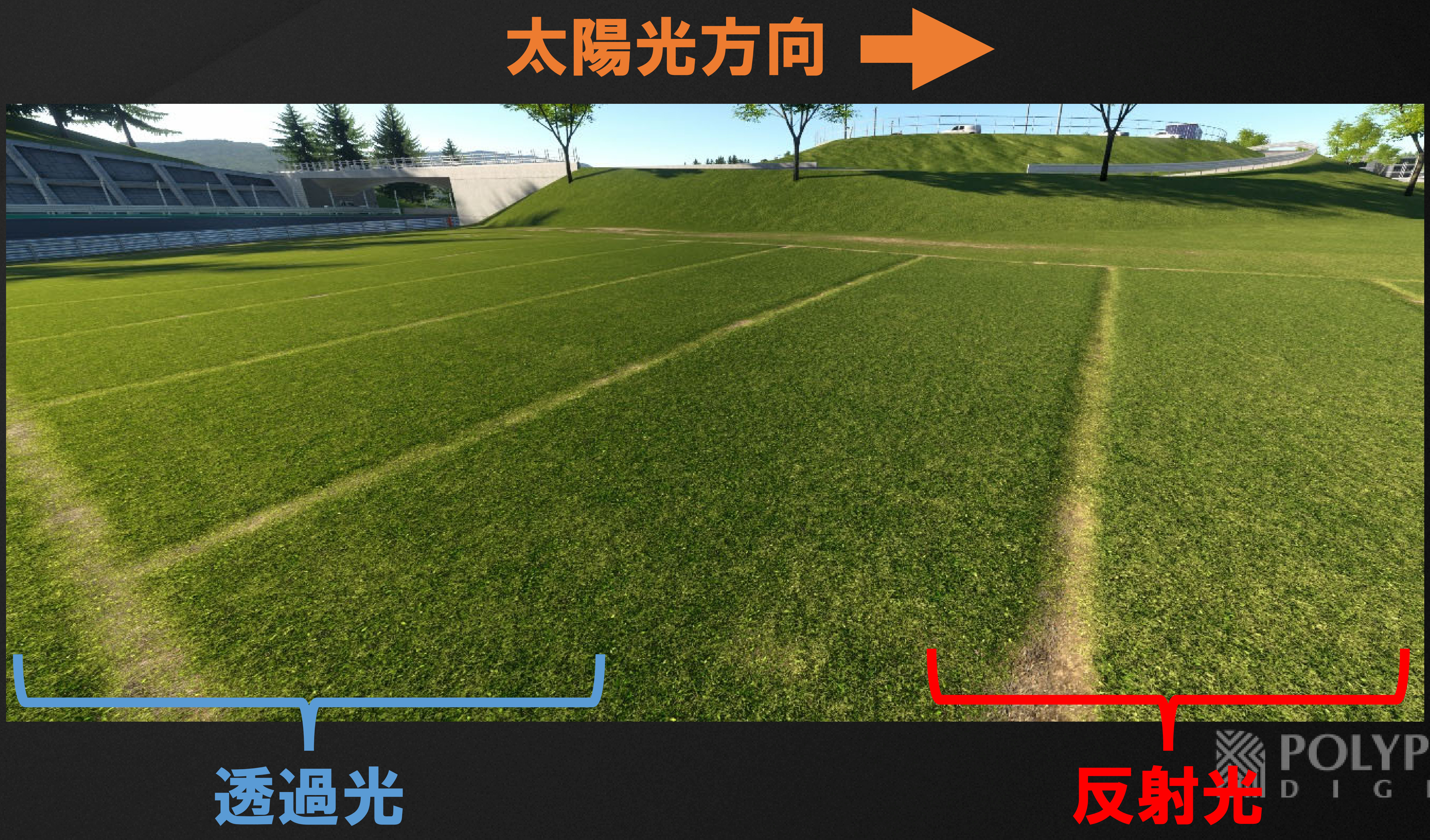


その他のテクニック２

サイド光での芝生の明るさについて

- **サイド光**の下で芝生を見ると、**光が回り込んでこない。**
  - ビルボードに対して垂直に光が差しているような状態。
  - 特にMipMapレベルが上がると光を拾いにくい。



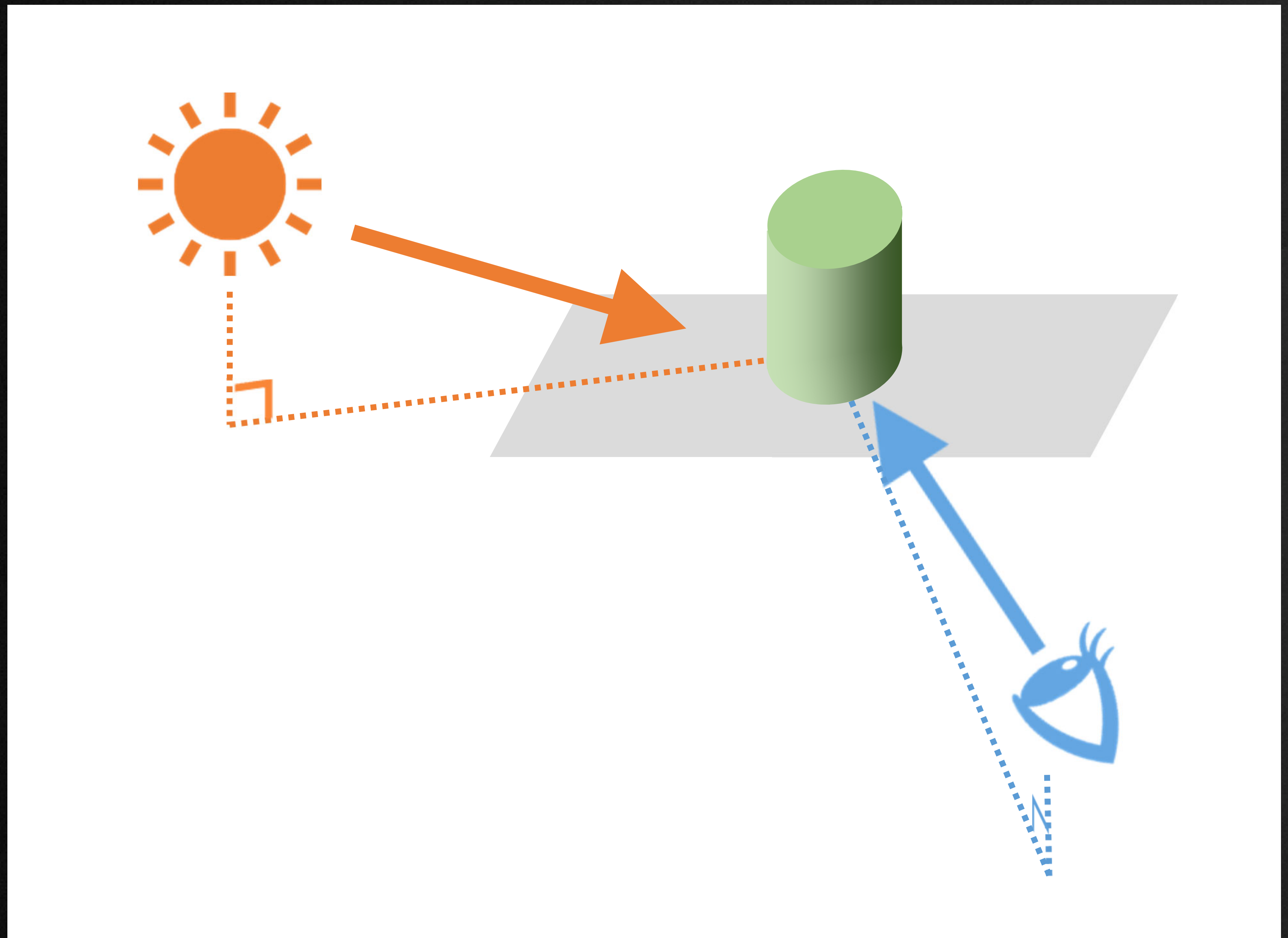


POLYPHONY™ DIGITAL

その他のテクニック２

サイド光での芝生の明るさについて

- 対応：コサイン項の値を持ち上げる。
  - Light Wrap [Brinck et al. 2016]
  - 低い角度から見た際、円筒の可視コサイン項の平均値で置き換えた。



太陽光方向

POLYPHONY™ DIGITAL

結果

適用前

適用後

適用前

適用後

POLYPHONY™
DIGITAL

適用前
unicorn media
Transurban
MILES
LEMPEL
FLY AMERICA
BRIGHTON ANTIQUES
BLU STRADA
ADORF
ABSOLUM

適用後
unicorn media
Transurban
MILES
FLY AMERICA
BRIGHTON ANTIQUES
BLU STRADA
ADORF

見た目の一貫性

見た目の一貫性

見た目の一貫性

見た目の一貫性

今後

- 他の形状のマテリアルへの一般化
  - 土、木、布、…
- マクロスケールジオメトリとの理論的な統合
  - 見た目を変えずにLoDを変化させる
- 多重散乱のモデル化を行う

POLYPHONY™ DIGITAL

まとめ

- メソスケール構造の見た目への影響を考慮した路面・芝生のシェーダーを実装した。
- 視差
  - 可視法線分布や可視AOの変化を計測し、シェーダー上で再現した。
- ローカルシャドウ
  - リファレンスとの比較を通して軽量な近似式を探し、実装した。

参考文献

- [Heitz 2014] Eric Heitz. 2014. Understanding the Masking-Shadowing Function in Microfacet-Based BRDFs. Journal of Computer Graphics Techniques (JCGT), vol. 3, no. 2, 48-107, 2014. http://jcgt.org/published/0003/02/03/
- [Wu et al. 2019] Lifan Wu, Shuang Zhao, Ling-Qi Yan, and Ravi Ramamoorthi. 2019. Accurate appearance preserving prefiltering for rendering displacement-mapped surfaces. ACM Trans. Graph. 38, 4 (August 2019). DOI: https://doi.org/10.1145/3306346.3322936
- [Ozawa 2018] Yuki Ozawa. 2018. ゲーム開発のためのレイトレーシング. CEDEC 2018. https://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/1894
- [Kojima et al. 2013] Hideo Kojima, Hideki Sasaki, Junji Tago, Masayuki Suzuki. 2013. MGS5 & Fox Engine. GDC 2013 Panel.
- [Lagarde 2017] Sébastien Lagarde. 2017. Physically-Based Materials: Where Are We? In ACM SIGGRAPH 2017 Courses (SIGGRAPH '17), Association for Computing Machinery, Los Angeles, California.
- [Brinck et al. 2016] Waylon Brinck, Andrew Maximov, Yibing Jiang. 2016. The technical art of uncharted 4. In ACM SIGGRAPH 2016 Courses (SIGGRAPH '16), Association for Computing Machinery, Anaheim, California. DOI: https://doi.org/10.1145/2897839.2936731

POLYPHONY™ DIGITAL

本セッションのまとめ

- グランツーリスモ7のグラフィックス技術を紹介。
- リアルタイムレイトレーシング
- 天球レンダリング
- 路面・芝生のメソスケール材質表現

POLYPHONY™ DIGITAL